

**ANALISIS GSS (*GROUND SHEAR STRAIN*) DENGAN METODE HVSRR
MENGUNAKAN DATA MIKROSEISMIK PADA JALUR SESAR OPAK**

SKRIPSI

Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan

Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains



Oleh:

YUNI SETIAWATI

NIM. 12306141009

PROGRAM STUDI FISIKA

JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA

2016

PERSETUJUAN

Skripsi yang berjudul “ANALISIS GSS (*GROUND SHEAR STRAIN*) DENGAN METODE HVSR MENGGUNAKAN DATA MIKROSEISMIK PADA JALUR SESAR OPAK “ yang disusun oleh Yuni Setiawati, NIM. 12306141009 ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diujikan.



Yogyakarta, Desember 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Nugroho Budi Wibowo, M.Si
NIP. 19840223 200801 1 001

Denny Darmawan, M.Sc
NIP. 197912022003121002

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “ANALISIS GSS (*GROUND SHEAR STRAIN*) DENGAN METODE HVSR MENGGUNAKAN DATA MIKROSEISMIK PADA JALUR SESAR OPAK “ yang disusun oleh Yuni Setiawati, NIM. 12306141009 ini telah dipertahankan di depan Dewan Penguji pada tanggal 3 Januari 2017 dan dinyatakan LULUS.

DEWAN PENGUJI			
Nama	Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
<u>Nugroho Budi Wibowo, M.Si</u> NIP. 19840223 200801 1 001	Ketua Penguji		16 - 01 - 2017
<u>Denny Darmawan, M. Sc</u> NIP. 1510516 17603 1 001	Sekretaris Penguji		16 - 01 - 2017
<u>Dr. Warsono, M. Si</u> NIP. 1968110119903 1 002	Penguji Utama		16 - 01 - 2017
Yogyakarta, 17 Januari 2017			

Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan,



Dr. Hartono

NIP.19620329 198702 1 002

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yuni Setiawati

NIM : 12306141009

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Judul Skripsi : Analisis Gss (*Ground Shear Strain*) dengan Metode HVSR
Menggunakan Data Mikroseismik Pada Jalur Sesar Opak.

Menyatakan bahwa skripsi ini benar – benar penelitian dan karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim. Apabila terbukti pernyataan tidak benar, sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya.

Yogyakarta, 20 Desember 2016

Yang menyatakan,



Yuni Setiawati
NIM. 12306141009

MOTTO

“Maka sesungguhnya dibalik kesulitan ada kemudahan...”

(QS. Al-Insyirah: 5)

“Jangan tunggu sampai besok apa yang bisa kamu lakukan hari
ini”

“Think as big as galaxy!”

“Intelligence is not the measurement, but intelligence support all”

PERSEMBAHAN

Dengan mengucap rasa syukur yang tiada hentinya kepada-Nya

Alhamdulillahirobil'amin, karya ini ku persembahkan..

untuk Orang Tuaku tercinta,

Bapak Yatiman dan Ibu Rosmawati

untuk Kakak dan Adikku yang tersayang,

Yanti Septiani dan Iis Suwarni

untuk semua Teman dan Sahabatku

dan untuk orang-orang yang senantiasa mendukungku

terimakasih atas motivasi dan doa yang tak pernah berhenti..

ANALISIS GSS (*GROUND SHEAR STRAIN*) DENGAN METODE HVSR MENGUNAKAN DATA MIKROSEISMIK PADA JALUR SESAR OPAK

Oleh:
Yuni Setiawati
12306141009

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang GSS (*Ground Shear Strain*) dengan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) menggunakan data mikroseismik pada jalur Sesar Opak. Penelitian bertujuan untuk mengetahui nilai GSS sepanjang jalur Sesar Opak dan memprediksi fenomena berdasarkan nilai GSS di sepanjang jalur Sesar Opak.

Data mikrotremor diambil di 39 titik pengamatan sebagai data primer dengan jarak antar titik 2 km dan penambahan data sekunder sebanyak 46 titik yang berasal dari peneliti sebelumnya dan BMKG. Data mikrotremor dianalisis menggunakan metode HVSR untuk memperoleh nilai faktor amplifikasi dan nilai frekuensi dominan. Data hasil pengolahan mikrotremor digunakan untuk menghitung nilai indeks kerentanan seismik dan nilai percepatan tanah maksimum (PGA). Nilai percepatan tanah maksimum ditentukan dengan metode Kanai, dengan parameter data gempabumi 27 Mei 2006. Nilai indeks kerentanan seismik dan nilai percepatan tanah maksimum digunakan untuk menentukan nilai GSS.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai GSS di sepanjang jalur Sesar Opak berkisar $3,9 \times 10^{-5}$ sampai dengan $5,3 \times 10^{-3}$. Daerah yang memiliki GSS tertinggi berada di daerah Sanden dan terendah di daerah Piyungan. Fenomena yang mungkin terjadi yaitu getaran, keretakan tanah dan penurunan tanah.

Kata kunci: *Ground Shear Strain, Horizontal to Vertical Spectral Ratio, mikrotremor*

**ANALYSIS OF GSS (GROUND SHEAR STRAIN) USING HVSR METHOD
FROM MICROSEISMIC DATA ON OPAK FAULT LINES**

by:
Yuni Setiawati
12306141009

ABSTRACT

The research about GSS (Ground Shear Strain) using Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method from microseismic data on Opak fault lines had been finished. The research aimed to determine GSS value along Opak fault lines and to predict phenomena based on GSS value along Opak fault lines.

The microtremor data was taken on 39 observation points with 2 km spacing as primary data and 46 points added as secondary data from previous research and BMKG. Microtremor data was analysed using HVSR method to get amplification factor and predominant frequency. The data from microtremor signal were used to determine the seismic vulnerability index and peak ground acceleration (PGA). Peak ground acceleration value was determined using Kanai method, with parameter data taken from 27 Mei 2006 earthquake source. Seismic vulnerability index value and peak ground acceleration value were used to determine GSS value.

The result of this research showed that GSS value along Opak fault lines was about $3,9 \times 10^{-5}$ to $5,3 \times 10^{-3}$. Area that has highest GSS was in Sanden area and the lowest one was in Piyungan area. The phenomena that can be happen were vibration, cracked ground and land subsidence.

Keywords : *Ground Shear Strain, Horizontal to Vertical Spectral Ratio, microtremor*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb,

Segala puji atas kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat serta hidayahnya sehingga penulisan skripsi dengan judul “Analisis GSS (*Ground Shear Strain*) dengan metode HVSR Menggunakan Data Mikroseismik Pada Jalur Sesar Opak” ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik tidak terlepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Nugroho Budi Wibowo, M. Si. Dan Bapak Denny Darmawan, M. Sc. selaku pembimbing yang telah meluangkan waktunya di sela kesibukan dan istirahat, terimakasih untuk bimbingan bukan hanya waktu tetapi semangat dan motivasinya.
2. Semua Dosen Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan yang sangat banyak bermanfaat.
3. Semua staff dan laboran Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY yang selalu ikhlas membantu dan menyediakan fasilitas.
4. Orang Tua tercinta (Yatiman dan Rosmawati) terimakasih yang tiada batas karena telah mendukung dan membiayai semua kegiatan yang saya lakukan.
5. Teman-teman *Physics B* 2012 yang selalu ikhlas untuk berbagi segala hal.
6. Tim AYA (Aisyah dan Anisa) yang selalu ada kapanpun dan selalu siap siaga menghibur dengan penuh rasa sayang.

7. Tim lima mili-meter (Arif S, Umi H, Yustina D dan Rifka A) yang selalu setia membantu dan menjadi partner kelompok yang sangat baik.
8. Teman-teman jalan-jalan tanpa arah (Mahmudah, Hilma, Nuril, Siti dan Endah) yang selalu mengibur kepenatan diri.
9. Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Tidak ada yang sempurna dalam segala hal di dunia ini, sama halnya dengan penulisan tugas akhir ini. Masih banyaknya kekurangan dalam karya ilmiah ini, oleh karena itu sangat diperlukannya saran dan kritik untuk menyempurnakan tugas akhir ini. Semoga karya ini memberikan manfaat bagi masyarakat dan ilmu pengetahuan. Amin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 23 Desember 2016
Yang menyatakan,



Yuni Setiawati
NIM. 12306141009

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN.....	iv
MOTTO	v
PERSEMBAHAN.....	vxi
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xxvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang Masalah.....	1
B. Identifikasi Masalah	6
C. Pembatasan Masalah	6
D. Rumusan Masalah	7
E. Tujuan Penelitian	7
F. Manfaat Penelitian	7
BAB II KAJIAN PUSTAKA	8
A. Dasar Teori.....	8

1. Gempabumi	8
2. Gelombang Seimik	13
3. Mikrotremor	21
4. Sesar Opak.....	22
5. <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr)	23
6. Transformasi Fourier, DFT, dan FFT	25
7. Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA).....	33
8. <i>Ground Shear Strain</i> (γ).....	35
9. Mikrozonasi.....	38
B. Penelitian yang Relevan	38
C. Kerangka Pikir	39
BAB III METODE PENELITIAN	40
A. Waktu dan Tempat Penelitian	40
B. Variabel Penelitian	40
C. Instrumen Penelitian.....	40
D. Teknik Pengumpulan Data.....	42
E. Teknik Analisis Data.....	45
F. Diagram Alir Penelitian	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	58
A. Kesimpulan	58
B. Saran.....	58

DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN.....	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Dinamika Tektonik Di Indonesia	2
Gambar 2. Peta Seimisisitas Pulau Jawa.....	3
Gambar 3. Ilustrasi <i>Subduction</i>	9
Gambar 4. Ilustrasi <i>Extrusion</i>	9
Gambar 5. Ilustrasi <i>Transcursion</i>	10
Gambar 6. Distribusi Episenter Gempabumi Kuat Periode 1840 – 2006	13
Gambar 7. Komponen-Komponen Gaya Pada Medium Kubus.....	14
Gambar 8. Ilustrasi Gelombang P	19
Gambar 9. Ilustrasi Gelombang S	19
Gambar 10. Gelombang Rayleigh.....	20
Gambar 11. Ilustrasi Gerak Gelombang Love	21
Gambar 12. Satu Set Seismograf TDL-303S	41
Gambar 13. Peta Lokasi Pengambilan Data.....	43
Gambar 14. Diagram Alir	46
Gambar 15. Mikrozonasi Nilai Indeks Kerentanan Seisimik	48
Gambar 16. Grafik Nilai PGA di Sepanjang Jalur Sesar Opak Berdasarkan Sumber Gempa 2006 sampai dengan 2015.....	49
Gambar 17. Mikrozonasi Nilai Percepatan Tanah Maksimum (PGA)	51
Gambar 18. Mikrozonasi Nilai Periode Predominan	52
Gambar 19. Mikrozonasi Nilai GSS	54
Gambar 20. Mikrozonasi Nilai GSS di- <i>Overlay</i> dengan Formasi Daerah Penelitian Peta Geologi.....	55
Gambar 21. <i>3D-Surface</i> Nilai GSS (<i>Ground Shear Strain</i>).....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Konversi Kanai & Tanaka dengan Omote-Nakajima.....	34
Tabel 2. Hubungan Antara Regangan dengan Sifat Dinamis Tanah	36
Tabel 3. Persyaratan Teknis Survei Mikrotremor	45

DAFTAR LAMPIRAN

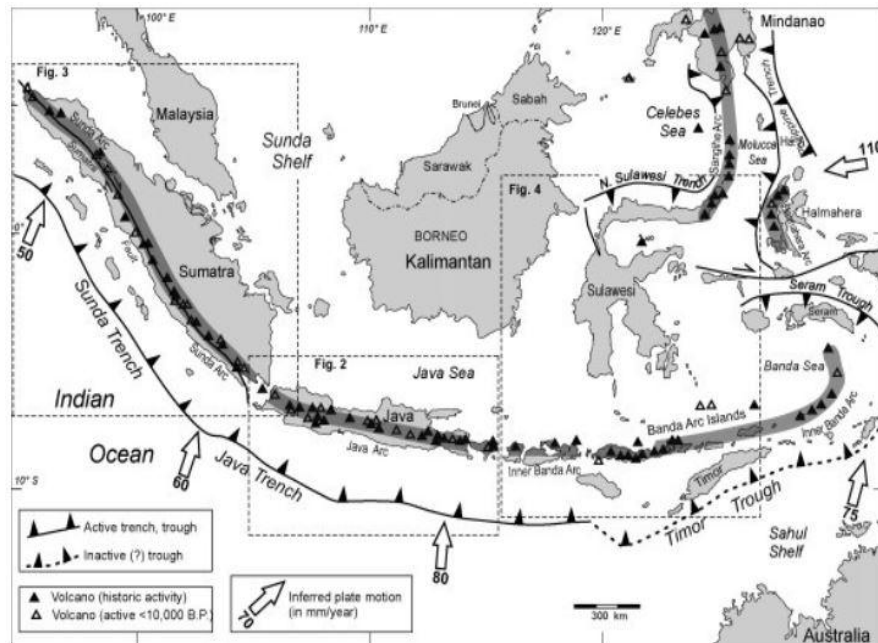
Lampiran 1. Indeks Kerentanan Seismik Dan PGA.....	63
Lampiran 2. GSS dan Fenomena Yang Terjadi Dari Nilainya	67
Lampiran 3. Program Analisis <i>Geopsy</i>	71
Lampiran 4. Program Analisis <i>Matlab</i>	74
Lampiran 5. Analisis Mikrotremor dengan Software MATLAB R2010a	80
Lampiran 6. Program Analisis <i>Geopsy</i>	84
Lampiran 7. Kriteria <i>Reliable Curve</i> dan <i>Clear Peak SESAME</i>	87
Lampiran 8. Grafik HVSR Analisis Mikrotremor	90
Lampiran 9. Program TCX	112
Lampiran 10. Dokumentasi.....	117
Lampiran 11. Data <i>checklist SESAME</i>	119

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Gempabumi adalah getaran pada bumi yang disebabkan oleh pergerakan tiba-tiba akibat patahnya batuan yang mengalami regangan melampaui batas elastisitasnya (Sapiie dkk, 2001). Akumulasi energi penyebab terjadinya gempabumi dihasilkan dari lempeng tektonik yang bergerak. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah dalam bentuk gelombang gempabumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi (BMKG, 2010).

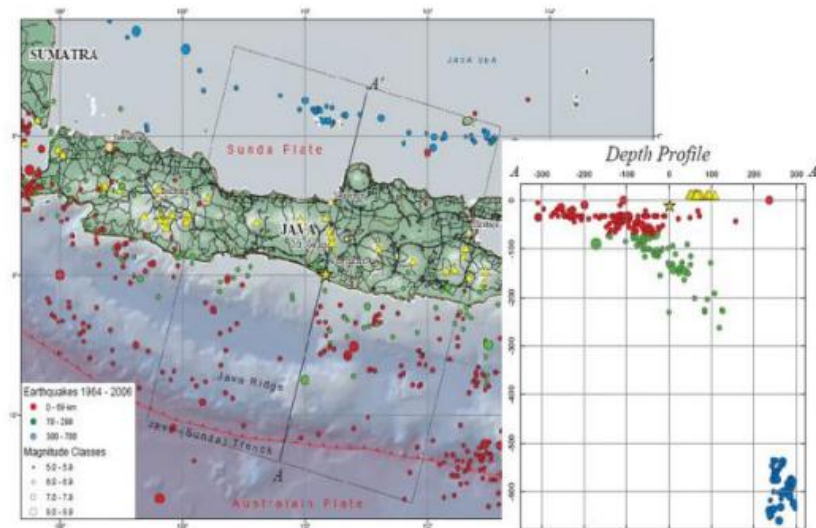
Letak Indonesia secara astronomis membentang 6°LU - 11°LS dan 95°BT - 141°BT , sedangkan secara geografis wilayah Indonesia ini berada di antara tiga lempeng besar dunia yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng IndoAustralia dan Lempeng Pasifik. Dari interaksi ketiga lempeng tersebut terbentuk kepulauan Indonesia yang memiliki kondisi geologi yang sangat kompleks. Pergerakan lempeng samudera dan benua dalam bentuk tumbukan dan gesekan menimbulkan beberapa zona subduksi dan patahan permukaan. Pergerakan ini akan membebaskan sejumlah energi yang telah terkumpul sekian lama secara tiba-tiba, di mana proses pelepasan tersebut menimbulkan getaran gempabumi dengan nilai yang beragam (Kertapati, 2006), peristiwa ini disebut dengan gempabumi tektonik. Dinamika tektonik di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Dinamika Tektonik di Indonesia (Hochstein&Sudarman, 2008).

Berdasarkan kondisi seismisitas yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Peta Seismitas Pulau Jawa), zona selatan Pulau Jawa memiliki tingkat gempabumi yang cukup tinggi (Husein dkk, 2008). Daerah Yogyakarta merupakan bagian dari jalur gempabumi yang terbentang dari Pulau Sumatera, Jawa, Bali hingga Nusa Tenggara yang termasuk pada zona subduksi lempeng Indo-Australia-Eurasia. Pertemuan dua lempeng ini menyebabkan wilayah ini sangat rentan terhadap gempa bumi. Selain rawan gempabumi akibat aktivitas tumbukan lempeng, daerah Yogyakarta rawan gempabumi akibat aktivitas beberapa sesar lokal di daratan (Daryono, 2009). Struktur sesar terbentuk sebagai dampak desakan lempeng Indo-Australia pada bagian daratan Pulau Jawa. Beberapa sistem sesar yang diduga masih aktif adalah Sesar Opak, Sesar Oyo, Sesar Dengkeng, Sesar Progo, serta sesar mikro lainnya yang belum teridentifikasi.

Hasil survei GPS-geodesi untuk memetakan pergerakan tanah yang berkaitan dengan pergerakan patahan gempa (*coseismic displacement*) oleh Abidin (2007) mengindikasikan dengan cukup jelas bahwa blok di sebelah timur lokasi Patahan Opak bergerak relatif ke arah timur dan timur laut sedangkan blok di barat Patahan Opak bergerak ke arah selatan dan barat daya. Artinya, studi tektonik geodesi menunjang keberadaan lokasi patahan gempa di sepanjang Sungai Opak, sehingga penelitian dilakukan di sepanjang jalur Sesar Opak dari kawasan Bantul sampai dengan kawasan Prambanan.



Gambar 2. Peta seismisitas pulau Jawa (USGS, 2006).

Pada 27 Mei 2006, gempabumi kedalaman 12 km dengan kekuatan 5,9 SR (Skala Richter) meluluhlantakkan sebagian Provinsi D.I. Yogyakarta dan sekitarnya, disebabkan adanya gerakan aktif dari Sesar Opak yang menimbulkan kerusakan sangat parah. Gempa dirasakan khususnya di Yogyakarta (VI – VII MMI), Solo (IV – V MMI), Klaten (VI – VII MMI), Semarang (II – III MMI), Surabaya (II - III MMI), dan Karangates (III – IV MMI) (BMKG, 2006). Lebih

dari 5.000 orang meninggal, kerugian harta benda yang besar, dan banyak kerusakan lingkungan. Sejumlah retakan tanah, likuifaksi, dan longsor terjadi di wilayah Yogyakarta yang menandakan guncangan gempa cukup kuat. Daerah Bantul mengalami kerusakan terparah, sehingga gempa 27 Mei 2006 dapat pula disebut sebagai “Gempa Bantul 2006”. Gempa Yogyakarta 2006 adalah salah satu gempa dengan korban terbanyak di Indonesia sejak tahun 1612. Selain itu kawasan Prambanan yang memiliki sedimen lunak mengalami guncangan tanah yang kuat dengan percepatan tanah $(2 - 3) \text{ m/s}^2$ atau $(200 - 300) \text{ gal}$ yang termasuk model heterogen. Percepatan yang tinggi ini telah mengakibatkan retakan tanah dan gejala likuifaksi di wilayah sekitar candi dan kerusakan pada candi, yakni bergesernya pasangan batu pondasi candi secara tegak dan mendatar, dan jatuhnya stupa yang mengelilingi mahkota candi (ESDM, 2006).

Resiko yang ditimbulkan oleh bencana gempabumi berpengaruh terhadap kehidupan manusia karena dapat berdampak korban jiwa. Perencanaan wilayah dan penyediaan media informasi, kemudian komunikasi yang kritis dan terkini (*up to date*) diperlukan sebagai sarana untuk meningkatkan respon terhadap bencana yang bisa saja berdampak korban jiwa. Mitigasi bencana merupakan upaya untuk menanggulangi resiko bencana, baik dengan cara pembangunan fisik, penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi bencana (Bakornas PBP, 2006). Mitigasi gempabumi mencakup konsep pemodelan dan rencana awal mitigasi bencana yang harus diimplementasikan untuk resiko bencana gempabumi. Konsep pemodelan dapat dilakukan dengan menganalisis nilai GSS (*Ground Shear Strain*), dimana GSS menunjukkan kemampuan suatu lapisan

tanah untuk meregang dan menggeser apabila terjadi gempa bumi. GSS dapat digunakan untuk mengkarakterisasi dampak yang terjadi saat gempa bumi, seperti likuifaksi, tanah retak, penurunan tanah, tanah longsor dan bergetarnya tanah.

Mikrotremor merupakan getaran lemah dari tanah yang disebabkan oleh gangguan alam atau buatan, seperti angin, gelombang laut, lalu lintas dan mesin industri (Motamed *et al.*, 2007). Data mikrotremor dengan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) dapat digunakan untuk menentukan nilai GSS. Hasil analisis HVSR menunjukkan spektrum frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A) yang menggambarkan karakteristik dinamis tanah (Nakamura, 2000). Metode analisis HVSR dikembangkan untuk menghitung rasio spektrum Fourier dari sinyal mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya (Nakamura, 1989).

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan di atas dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Belum adanya mitigasi bencana untuk keseluruhan daerah di sepanjang jalur Sesar Opak.
2. Belum adanya konsep pemodelan analisis GSS di sepanjang jalur Sesar Opak.
3. Belum diketahui fenomena yang terjadi berdasarkan GSS di sepanjang jalur Sesar Opak.

C. Pembatasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan dalam studi berupa data mikrotremor di sepanjang jalur Sesar Opak.
2. Pengambilan data mikrotremor mengacu pada aturan yang ditetapkan oleh *SESAME European Research Project*.
3. Data mikrotremor sepanjang jalur Sesar Opak diambil berdasarkan data primer 39 titik dan data sekunder 46 (total 85 titik) dengan jarak antar titik adalah 2 kilometer.

D. Rumusan Masalah

Dari identifikasi masalah di atas dapat diperoleh rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Berapa nilai GSS (*Ground Shear Strain*) sepanjang jalur Sesar Opak?
2. Apakah fenomena yang mungkin terjadi berdasarkan nilai GSS di sepanjang jalur Sesar Opak?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menentukan nilai GSS (*Ground Shear Strain*) sepanjang jalur Sesar Opak.
2. Memprediksi fenomena berdasarkan nilai GSS di sepanjang jalur Sesar Opak.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi tentang daerah yang rawan bencana, supaya pembangunan di dalam daerah tersebut aman.
2. Memberikan informasi tentang pentingnya upaya penanggulangan bencana secara dini untuk meningkatkan respon masyarakat jika terjadi bencana di suatu wilayah.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

A. Dasar Teori

1. Gempabumi

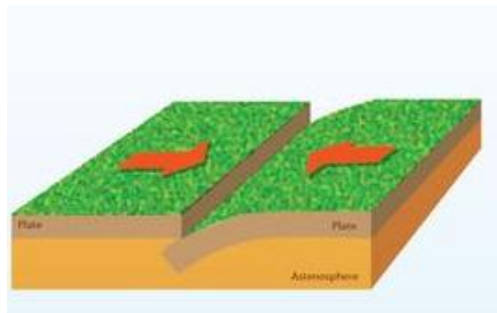
a. Pengertian Gempabumi

Pada hakekatnya gempabumi adalah getaran atau serentetan getaran dari kulit bumi yang bersifat tidak abadi atau sementara dan kemudian menyebar ke segala arah. Gempabumi merupakan hentakan besar yang terjadi sekaligus akibat penimbunan energi elastik atau *strain* dalam waktu yang lama secara kontinyu akibat dari adanya proses pergerakan lempeng benua dan samudra (Nandi, 2006). Mekanisme kerusakan terjadi karena energi getaran gempa dirambatkan ke seluruh bagian bumi. Di permukaan bumi, getaran tersebut dapat menyebabkan kerusakan dan runtuhnya bangunan sehingga dapat menimbulkan korban jiwa. Getaran gempa juga dapat memicu terjadinya tanah longsor, runtuh batuan, dan kerusakan tanah lainnya yang merusak pemukiman penduduk. Gempabumi juga menyebabkan bencana ikutan berupa kebakaran, kecelakaan industri dan transportasi serta banjir akibat runtuhnya bendungan maupun tanggul penahan lainnya.

Banyak teori yang telah dikemukakan mengenai penyebab terjadinya gempabumi. Menurut pendapat para ahli, sebab-sebab terjadinya gempabumi salah satunya adalah akibat dari aktivitas tektonik. Bumi diselimuti oleh beberapa lempeng kaku keras (lapisan litosfer) yang berada di atas lapisan yang lebih lunak dari litosfer dan lempeng-lempeng tersebut terus bergerak dengan laju

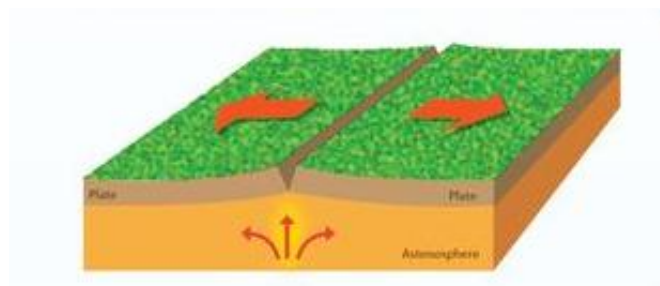
tertentu per tahun. Pergerakan lempeng-lempeng tektonik ini menyebabkan terjadinya penimbunan energi secara perlahan-lahan. Gempabumi tektonik kemudian terjadi karena adanya pelepasan energi yang telah lama tertimbun tersebut. Daerah yang paling rawan gempabumi umumnya berada pada pertemuan lempeng-lempeng tersebut. Pertemuan dua buah lempeng tektonik akan menyebabkan pergeseran relatif pada batas lempeng tersebut, dengan peristiwa-peristiwa berikut.

- a. *Subduction*, yaitu peristiwa dimana salah satu lempeng mengalah dan dipaksa turun ke bawah seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Peristiwa inilah yang paling banyak menyebabkan gempabumi.



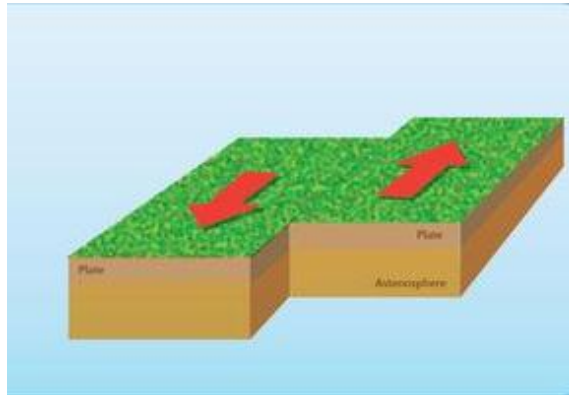
Gambar 3. Ilustrasi *subduction* (Thomson, 2006).

- b. *Extrusion*, yaitu penarikan satu lempeng terhadap lempeng yang lain seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi *Extrusion* (Thomson, 2006).

- c. *Transcursion*, yaitu terjadi gerakan horizontal satu lempeng terhadap lempeng yang lainnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi *Transcursion* (Thomson, 2006).

Berdasarkan kedalaman pusat sumber gempabumi, gempabumi dibedakan menjadi tiga (Sonjaya, 2008):

1) Gempabumi dangkal

Gempabumi dangkal merupakan gempabumi dengan pusat gempa berada kurang dari 50 km dari permukaan bumi. Di Indonesia gempabumi dangkal letaknya terpencar. Gempabumi semacam ini dapat menimbulkan kerusakan besar. Makin dangkal gempabumi itu, daya rusaknya makin besar.

2) Gempabumi menengah

Gempabumi menengah merupakan gempabumi dengan pusat gempa berada antara (50 - 300) km di bawah permukaan bumi. Di Indonesia gempabumi menengah terbentang sepanjang Sumatra sebelah barat, Jawa sebelah selatan, selanjutnya Nusa Tenggara antara Sumbawa dan Maluku, akhirnya sepanjang Teluk Tomini, Laut Maluku ke Filipina.

Gempabumi menengah dengan kedalaman sumber gempabumi kurang dari 150 km di bawah permukaan masih dapat menimbulkan kerusakan.

3) Gempabumi dalam

Gempabumi dalam merupakan gempabumi dengan pusat gempabumi berada pada kedalaman lebih dari 300 km di bawah permukaan bumi. Di Indonesia gempabumi dalam berada di bawah Laut Jawa, Laut Flores, Laut Banda dan Laut Sulawesi. Gempabumi dalam tidak membahayakan.

b. Parameter Sumber Gempabumi

Beberapa parameter dasar gempabumi yang mempengaruhi terjadinya gempabumi adalah:

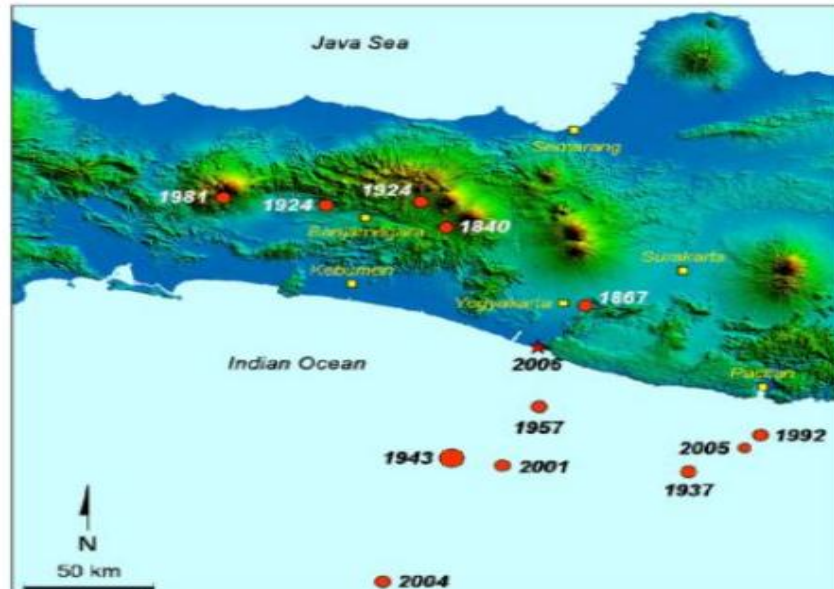
- a. Hiposenter, yaitu tempat terjadinya gempabumi atau pergeseran tanah di dalam bumi.
- b. Episenter, yaitu titik yang diproyeksikan tepat berada di atas hiposenter pada permukaan bumi.
- c. Batuan dasar, yaitu tanah keras tempat mulai bekerjanya gaya gempa.
- d. Percepatan tanah, yaitu percepatan pada permukaan bumi akibat gempabumi.
- e. Faktor amplifikasi, yaitu faktor pembesaran percepatan gempabumi yang terjadi pada permukaan tanah akibat jenis tanah tertentu.
- f. Skala gempa, yaitu ukuran kekuatan gempa yang dapat diukur secara kuantitatif dan kualitatif. Pengukuran kekuatan gempabumi secara kuantitatif dilakukan dengan skala Richter yang umumnya dikenal sebagai pengukuran magnitudo gempabumi. Magnitudo gempabumi adalah ukuran

mutlak yang dikeluarkan oleh pusat gempabumi. Pendapat ini pertama kali dikemukakan oleh Richter dengan besar antara 0 sampai 9. Selama ini gempa terbesar tercatat sebesar 8,9 skala Richter terjadi di Columbia tahun 1906. Pengukuran kekuatan gempa secara kualitatif yaitu dengan melihat besarnya kerusakan yang diakibatkan oleh gempabumi. Ukuran tersebut disebut sebagai intensitas gempabumi.

c. Sejarah Kegempaan di Jawa

Berdasarkan catatan sejarah kegempaan Jawa antara tahun 1840 hingga 2010, Yogyakarta mengalami gempabumi merusak lebih dari 13 kali (Gambar 6). Gempabumi yang pertama kali tercatat adalah Gempabumi Purworejo (1840) dengan magnitudo 7 SR. Menurut Newcomb & Mc Cann (1987), gempabumi ini terjadi pada tanggal 4 Januari 1840. Daerah yang mengalami kerusakan meliputi Kebumen, Purworejo, Bantul, Salatiga, Demak, Semarang, Kendal, dan Banjarnegara. Selanjutnya adalah gempabumi besar pada tanggal 10 Juni 1867 dengan magnitudo 8 SR menyebabkan 372 rumah roboh dan 5 orang meninggal (Newcomb & McCann, 1987). Getaran gempabumi ini terasa hingga Klaten, Salatiga, Surakarta, dan Sragen. Gempabumi besar juga terjadi pada tanggal 23 Juli 1943 dengan magnitudo 8,1 SR. Kota-kota yang mengalami kerusakan adalah Cilacap, Tegal, Purwokerto, Kebumen, Purworejo, Bantul, dan Pacitan. Korban meninggal sebanyak 213 orang, sedangkan korban luka mencapai 2.096 jiwa (Bemmelen, 1949). Terakhir adalah gempabumi pada tanggal 27 Mei 2006 dengan magnitudo 5,9 SR, meskipun kekuatan

gempabumi ini relatif kecil ($M = 6.4SR$), namun mengakibatkan lebih dari 6000 korban meninggal (Walter dkk, 2008).



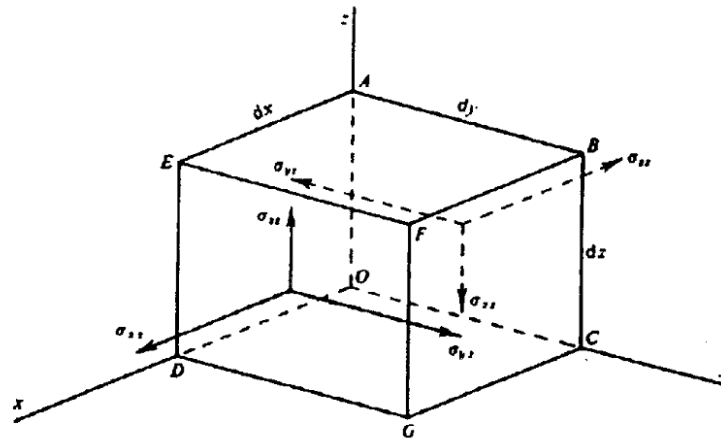
Gambar 6. Distribusi episenter gempabumi kuat periode 1840 – 2006 (Husein dkk, 2008)

2. Gelombang Seismik

Gelombang diartikan sebagai gangguan mekanis yang merambat melalui suatu medium akibat dari sumber getaran. Apabila medium yang digunakan untuk merambat adalah bumi, maka gelombang dinamakan gelombang seismik. Secara umum gelombang adalah fenomena usikan (gangguan) pada medium di sekitarnya. Gangguan mengakibatkan osilasi (pergeseran) partikel-partikel medium, berupa osilasi tekanan ataupun osilasi rapat massa. Gelombang seismik dapat ditimbulkan dengan dua metode yaitu metode aktif dan metode pasif. Metode aktif adalah metode pembangkitan gelombang seismik secara aktif atau disengaja menggunakan gangguan yang dibuat oleh manusia, biasanya digunakan untuk eksplorasi. Metode pasif adalah pembangkitan gelombang akibat gangguan

yang terjadi secara alamiah, contohnya gempa. Gelombang seismik termasuk dalam gelombang elastik karena medium yang dilalui yaitu bumi bersifat elastik. Oleh karena itu sifat penjalaran gelombang seismik bergantung pada elastisitas batuan yang dilewatinya. Adanya pergerakan dan gaya pada bumi menyebabkan batuan terdeformasi. Peristiwa deformasi ini berkaitan erat dengan konsep tegangan (*stress*), dan regangan (*strain*) (Telford *et al.*, 2004).

Persamaan gelombang seismik dapat didekati dengan meninjau komponen gaya-gaya tertentu yang bekerja pada sebuah medium homogen berupa kubus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Komponen-komponen gaya pada medium kubus (Telford *et al.*, 2004).

Stress (σ) yang bekerja pada salah satu permukaan kubus tersebut mempunyai komponen-komponen sebagai berikut.

$$\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx; \quad \sigma_{yx} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} dx; \quad \sigma_{zx} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} dx \quad (1)$$

Dengan σ_{xx} adalah komponen *stress* arah sumbu x terhadap bidang luasan dy, dz . σ_{yx} adalah komponen *stress* arah sumbu y terhadap bidang luasan dy, dz . σ_{zx} adalah komponen *stress* arah sumbu z terhadap bidang luasan dy, dz . Komponen-komponen *stress* di atas disebut gaya tiap satuan volume benda pada bidang x yang memiliki arah pada sumbu x , y , dan z . Untuk kasus permukaan bidang yang lain, hubungan variabel gaya tiap satuan volumenya analog dengan kasus pada bidang x . Total gaya pada sumbu x yang terjadi pada benda (medium) kubus adalah:

$$F = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2)$$

dengan $dx dy dz$ merupakan satuan volume kubus. Pada Hukum II Newton, jika tidak terjadi perubahan massa maka gaya merupakan perkalian antara massa benda (m) dan percepatannya (a). Apabila dikaitkan dengan persamaan densitas benda $\rho = m/V$, maka

$$F = ma = \rho V a = \rho (dx dy dz) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (3)$$

Dengan menggunakan definisi gaya pada persamaan (3), persamaan (2) dapat diubah menjadi persamaan (4).

$$\begin{aligned} \rho (dx dy dz) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) &= \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz \\ \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) &= \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Hubungan pada persamaan (4) disebut sebagai persamaan gerak searah sumbu x . Dengan cara yang sama, dapat diperoleh persamaan gerak pada arah lainnya.

Persamaan hubungan antara tegangan (*stress*) σ dan regangan (*strain*) ε adalah (Telford *et al.*, 2004):

$$\sigma_{ii} = \lambda' \Delta + 2\mu \varepsilon_{ii} , \quad i = x, y, z \quad (5)$$

$$\sigma_{ij} = \mu \varepsilon_{ij} , \quad i \neq j \quad (6)$$

dengan

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

u, v, w menunjukkan komponen perpindahan partikel, λ' adalah konstanta Lamé, μ merupakan modulus geser (N/m^2), dan Δ menunjukkan regangan volum atau dilatasi dengan definisi pada persamaan (8).

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (8)$$

Dengan menerapkan persamaan (5), (6), dan (7) maka persamaan (4) dapat diubah menjadi persamaan (9):

$$\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = (\lambda' + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (9)$$

dengan $\nabla^2 u = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$.

Melalui cara yang sama, persamaan (9) dapat diterapkan pada kasus pergerakan partikel searah sumbu y dan z sebagai berikut.

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda' + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda' + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (11)$$

dengan u, v, w secara berurutan menunjukkan pergeseran partikel pada arah sumbu x , sumbu y , dan sumbu z .

Gelombang merambat pada suatu medium ke segala arah. Secara tiga dimensi arah perambatan gelombang dinyatakan dengan sumbu x , y , dan z . Untuk menentukan persamaan gelombang dilakukan diferensiasi pada persamaan (9), (10), dan (11) masing-masing terhadap x , y , dan z . Berdasarkan persamaan (9) dapat diperoleh persamaan (12).

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) &= (\lambda' + \mu) \left(\frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial z^2} \right) + \\ &\quad \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} &= (\lambda' + 2\mu) \nabla^2 \Delta \\ \frac{\rho}{(\lambda' + 2\mu)} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} &= \nabla^2 \Delta \end{aligned} \quad (12)$$

Persamaan (12) merupakan persamaan gelombang longitudinal. Persamaan gelombang secara umum adalah

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \nabla^2 \Delta \quad (13)$$

Berdasarkan persamaan (12) tersebut diperoleh kecepatan gelombang seismik longitudinal atau dikenal dengan kecepatan gelombang-P (v_p) yaitu:

$$v_p = \left(\frac{\lambda' + 2\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Untuk mendapatkan persamaan gelombang transversal atau gelombang S, persamaan (10) didiferensialkan terhadap z dan persamaan (11) didiferensialkan

terhadap y . Hasil pendiferensialan persamaan (10) dikurangi dengan hasil pendiferensialan persamaan (11) menghasilkan:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Komponen regangan benda yang mengalami perpindahan secara rotasional (θ) didefinisikan pada persamaan (16) sebagai (Telford *et al.*, 2004):

$$\theta_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} ; \quad \theta_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} ; \quad \theta_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (16)$$

Dengan menerapkan persamaan (16) pada persamaan (15), diperoleh persamaan:

$$\frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = \nabla^2 \theta_x \quad (17)$$

dengan θ_x menyatakan gerakan rotasi tegak lurus terhadap sumbu x , sedangkan arah perambatan gelombangnya searah dengan sumbu x . Untuk kasus arah penjalaran gelombang searah sumbu y dan sumbu z digunakan cara yang sama, sehingga diperoleh persamaan:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\theta_y) = \mu \nabla^2 (\theta_y) \quad (18)$$

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\theta_z) = \mu \nabla^2 (\theta_z) \quad (19)$$

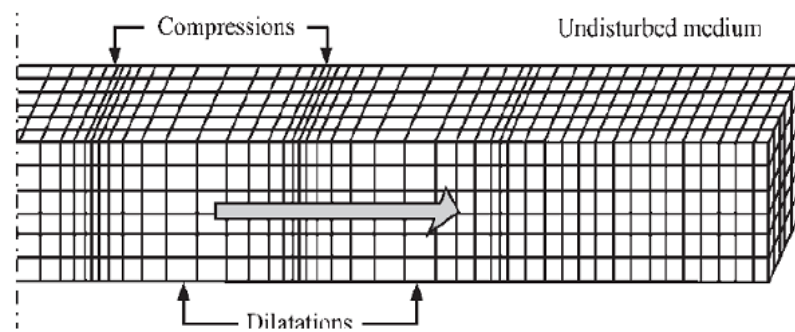
Persamaan (17), (18), dan (19) menyatakan persamaan gelombang transversal. Dari persamaan (18) dapat diperoleh kecepatan gelombang transversal atau dikenal dengan kecepatan gelombang-S sebagai:

$$v_s = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Menurut Telford *et al.* (2004), gelombang seismik terdiri dari dua tipe, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).

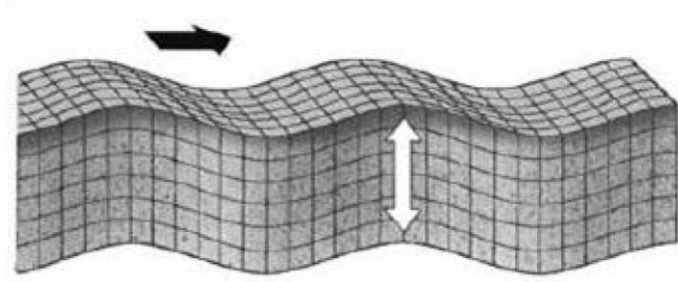
1. Gelombang Badan (*Body Wave*)

Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah rambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel, media, dan arah penjalarannya, gelombang dapat dibedakan menjadi gelombang P (Primer) dan gelombang S (Sekunder). Gelombang P disebut dengan gelombang kompresi atau gelombang longitudinal. Gambar 8 menunjukkan ilustrasi gerak gelombang P. Gelombang ini memiliki kecepatan perambatan paling besar dibandingkan dengan gelombang seismik yang lain. Gelombang P dapat merambat melalui medium padat, cair dan gas. Persamaan dari kecepatan gelombang P ditunjukkan pada persamaan (14).



Gambar 8. Ilustrasi Gelombang P (Elnashai dan Sarno, 2008).

Gelombang S disebut juga gelombang *shear* atau gelombang transversal yang ilustrasi geraknya ditunjukkan pada Gambar 9. Gelombang ini memiliki cepat rambat yang lebih lambat bila dibandingkan dengan gelombang P dan hanya dapat merambat pada medium padat saja. Pergerakan partikel pada gelombang S tegak lurus terhadap arah rambatnya. Persamaan dari kecepatan gelombang S (v_s) ditunjukkan pada persamaan (20).



Gambar 9. Ilustrasi Gelombang S (Ettwein dan Maslin, 2011).

2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang permukaan (*surface wave*) merupakan salah satu gelombang seismik selain gelombang badan (*body wave*). Gelombang ini terdapat pada batas permukaan medium. Berdasarkan sifat gerakan partikel pada media elastik, gelombang permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar. Gelombang ini menjalar akibat adanya efek *free surface* dengan terdapat perbedaan sifat elastik medium (Susilawati, 2008). Terdapat dua jenis gelombang permukaan, yaitu gelombang Rayleigh dan gelombang Love.

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang permukaan yang gerakan partikelnya menyerupai elips serta tegak lurus dengan permukaan dan arah penjarannya. Gelombang jenis ini merupakan gelombang permukaan yang terjadi akibat adanya interferensi antara gelombang tekan dengan gelombang geser secara konstruktif. Ilustrasi gelombang ini ditunjukkan pada Gambar 10. Gelombang Rayleigh merupakan gelombang yang mengilustrasikan gelombang seismik secara fisis. Gelombang seismik terdapat energi mekanik yang sebanding dengan nilai A^2 , dapat dirumuskan sebagai berikut:

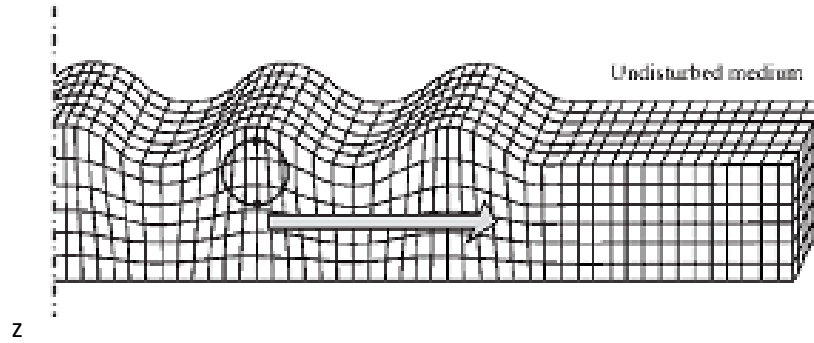
$$E = \frac{1}{2} k A^2 \quad (21)$$

dengan $k = 4\pi^2 m / T^2$ atau $k = 4\pi^2 m f^2$

Dimana m adalah massa partikel pada medium, yang merupakan hasil kali massa jenis dengan volumenya. T adalah periode dominan. f adalah frekuensi dominan.

Persamaan dari kecepatan gelombang Rayleigh (v_R) adalah (Elnashai dan Sarno, 2008):

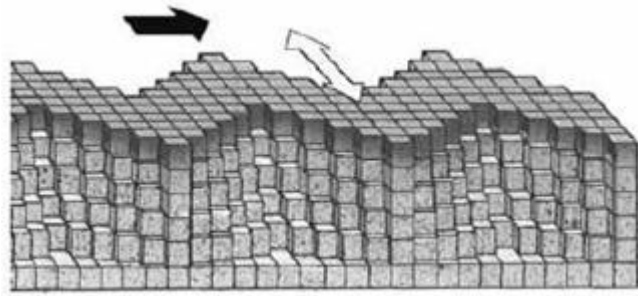
$$v_R = 0,92 v_s \quad (22)$$



Gambar 10. Gelombang Rayleigh (Elnashai dan Sarno, 2008).

Gelombang Love merupakan gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal dan merupakan gelombang S horizontal yang arah penjalarannya paralel dengan permukaannya (Gadallah and Fisher, 2009). Gambar 11 menunjukkan ilustrasi penjalaran gelombang Love. Kecepatan gelombang Love (v_Q) dinyatakan sebagai:

$$v_R < v_Q < v_s \quad (23)$$



Gambar 11. Ilustrasi gerak gelombang Love (Ettwein *and* Maslin, 2011).

3. Mikrotremor

Mikrotremor atau yang biasa disebut dengan *ambient vibration* adalah getaran tanah dengan amplitudo mikrometer yang dapat ditimbulkan oleh peristiwa alam ataupun buatan, seperti angin, gelombang laut atau getaran kendaraan yang bisa menggambarkan kondisi geologi suatu wilayah dekat permukaan (Tokimatsu, 2004). Survei mikrotremor pada umumnya dilakukan untuk berbagai aplikasi, seperti untuk pemantauan aktivitas gunung api, mendukung eksplorasi *geothermal*, mikrozonasi, penelitian geofisika lingkungan, serta aplikasi geoteknik (Wahyudi, 2008). Mikrotremor digunakan dalam teknik kegempaan untuk memperkirakan profil kecepatan gelombang geser (V_s). Mikrotremor didominasi oleh gelombang permukaan yang dapat digunakan untuk menentukan kurva dispersi gelombang Rayleigh tanpa memerlukan sumber tiruan (Abu, 2014).

Mikrotremor didasarkan pada perekaman *ambient noise* untuk menentukan parameter karakteristik dinamis (*damping ratio* dan frekuensi alami) dan fungsi transformasi (frekuensi dan amplifikasi) bangunan. Observasi mikrotremor dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik lapisan tanah berdasarkan parameter periode dominan dan faktor penguatan

gelombangnya (amplifikasi). Frekuensi dominan adalah frekuensi yang kerap muncul sehingga diakui sebagai nilai frekuensi dari batuan di suatu wilayah. Nilai frekuensi ini dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan di wilayah tersebut. Melalui nilai frekuensi dominan (f_0) dapat dihitung nilai periode dominan (T_0) berdasarkan persamaan (24).

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \quad (24)$$

Nilai periode dominan merupakan waktu yang dibutuhkan gelombang mikrotremor untuk mengalami satu kali pemantulan terhadap bidang pantulnya ke permukaan. Nilai periode dominan juga mengindikasikan karakter lapisan batuan yang ada di suatu wilayah (Arifin *et al.*, 2013).

Mikrotremor merupakan getaran tanah dengan amplitudo pergeseran sekitar 0,1-1 μm . Mikrotremor diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan rentang periodenya. Jenis pertama adalah mikrotremor periode pendek dengan periode kurang dari 1 detik dan keadaan ini terkait dengan struktur bawah permukaan yang dangkal dengan ketebalan beberapa puluh meter. Jenis kedua adalah mikrotremor periode panjang dengan periode lebih dari 1 detik, keadaan ini terkait struktur tanah yang lebih dalam, menunjukkan dasar dari batuan keras (Mirzaoglu & Dykmen, 2003).

4. Sesar Opak

Di sepanjang Sungai Opak terdapat sesar normal dengan panjang hampir 40 km dari pantai Selatan Jawa di mulut sungai ke arah Prambanan Kabupaten Klaten dengan arah 30 sampai 40 derajat ke timur laut. Di dalam peta gabungan lembar Surakarta dan lembar Yogyakarta (dengan modifikasi tahun 1994) Sesar

Opak memotong *Yogya Low* dan *Wonosari High* dengan batuan andesit tua (*Old Andesit Formation*) sebagai penyusun struktur pemotongan sesar, sedangkan di timur Opak masih terdapat Formasi Semilir dan Nglanggran yang juga terlibat dalam sistem sesar (Nurdwiyanto, 2007).

Struktur geologi utama yang berupa Sesar Opak merupakan sesar turun yang merupakan reaktivasi dari sesar mendatar yang telah ada lebih dulu. Beberapa sesar lain yang terpetakan di dalam Peta Geologi Lembar Yogyakarta antara lain sesar mendatar yang melewati sebagian Kali Oyo berarah relatif barat-timur. Sesar-sesar minor banyak dijumpai hampir di semua formasi yang ada dan secara umum berarah relatif barat laut – tenggara (Nurdwiyanto, 2011).

5. *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)*

HVSr adalah metode yang didasarkan pada asumsi bahwa rasio spektrum horizontal dan vertikal dari getaran permukaan merupakan fungsi perpindahan. Hal itu juga menunjukkan bahwa karakteristik dinamis lapisan permukaan secara kasar bisa dipahami pada titik yang diobservasi jika pengamatan bentuk gelombang *seismic microtremor* dilakukan pada tiga komponen, yaitu dua komponen horizontal dan satu komponen vertikal (Nakamura, 1989).

Energi mikrotremor sebagian besar bersumber dari gelombang Rayleigh, dan *site effect amplification* terjadi akibat keberadaan lapisan tanah lunak yang menempati setengah cekungan dari batuan dasar. Dalam kondisi ini ada empat komponen gerakan tanah yang terlibat, yaitu komponen gerak horizontal dan vertikal di batuan dasar dan komponen gerak horizontal dan vertikal di permukaan (Lermo, 1993). Faktor amplifikasi gerakan horizontal dan vertikal pada

permukaan tanah sedimen berdasarkan pada gerakan seismik di permukaan tanah yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar di area cekungan yang dilambangkan dengan T_H dan T_V (Nakamura, 2000). Besarnya faktor amplifikasi horizontal T_H adalah:

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (25)$$

dengan S_{HS} adalah spektrum dari komponen gerak horizontal di permukaan tanah dan S_{HB} adalah spektrum dari komponen gerak horizontal pada dasar lapisan tanah. Besarnya faktor amplifikasi vertikal T_V adalah:

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (26)$$

dengan S_{VS} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal di permukaan tanah dan S_{VB} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal pada dasar lapisan tanah.

Data mikrotremor tersusun atas beberapa jenis gelombang, tetapi yang utama adalah gelombang Rayleigh yang merambat pada lapisan sedimen di atas batuan dasar. Pengaruh dari gelombang Rayleigh pada rekaman mikrotremor besarnya sama untuk komponen vertikal dan horizontal saat rentang frekuensi (0,2 - 20,0) Hz, karena dalam range μm atau kecil sehingga rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati:

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} = 1 \quad (27)$$

Karena rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati nilai satu, maka gangguan yang terekam pada permukaan lapisan tanah akibat efek dari gelombang Rayleigh dapat dihilangkan, sehingga hanya ada

pengaruh yang disebabkan oleh struktur geologi lokal atau *site effect* (T_{SITE}). T_{SITE} menunjukkan puncak amplifikasi pada frekuensi dasar dari suatu lokasi (Slob, 2007). Berdasarkan persamaan (25), (26), dan (27) didapatkan besarnya T_{SITE} sebagai:

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (28)$$

sehingga

$$HVSr = T_{SITE} = \frac{\sqrt{[(S_{North-South})^2 + (S_{East-West})^2]}}{S_{VS}} \quad (29)$$

Persamaan (29) menjadi dasar perhitungan rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya atau *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr).

6. Transformasi Fourier, DFT, dan FFT

a. Transformasi Fourier

Dalam survei mikrotremor, transformasi Fourier digunakan untuk mengubah gelombang seismik dalam domain waktu menjadi domain frekuensi. Transformasi Fourier dikembangkan oleh Jean Baptise Joseph Fourier. Transformasi Fourier mendekomposisi sinyal ke dalam jumlahan tak hingga dari bentuk sinusoid dengan frekuensi dan nilai fase tertentu. Transformasi Fourier dalam kasus *continous-time* dan *continous-frequency* ditunjukkan pada persamaan (30). $X^F(\omega)$ adalah hasil Transformasi Fourier, ω adalah frekuensi angular (radian per detik), dan $x(t)$ merupakan sinyal dengan waktu yang kontinu (Park, 2010).

$$X^F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (30)$$

Persamaan (30) akan memiliki nilai apabila terpenuhinya syarat:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (31)$$

Untuk mendapatkan kembali sinyal berdomain waktu, perlu dilakukan inversi pada Transformasi Fourier seperti ditunjukkan persamaan (32).

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X^F(\omega)e^{+j\omega t} d\omega \quad (32)$$

b. *Discrete Fourier Transform* (DFT)

Transformasi Fourier pada kasus waktu dan frekuensi yang kontinyu pada persamaan (30) menggunakan operasi integral yang tidak dapat dipraktikkan dalam perhitungan menggunakan komputer. Untuk itu perlu dikembangkan sebuah Transformasi Fourier dalam kasus waktu yang diskrit. Dengan mengkonversi operasi integral ke operasi jumlahan seperti pada persamaan (33) dan ω menjadi θn seperti pada persamaan (34) akan dihasilkan *Discrete-Time Fourier Transform* (DTFT) yang diberikan pada persamaan (35).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rightarrow \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \quad (33)$$

$$e^{-j\omega} \rightarrow e^{-j\theta n} \quad (34)$$

$$X^f = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x[n]e^{-j\theta n} \quad (35)$$

Dalam algoritma DTFT, θ adalah frekuensi digital dengan satuan radian per sampel. Dengan kata lain algoritma DTFT belum bersifat diskrit pada domain

frekuensi. Perlu adanya *sampling* pada domain frekuensi seperti pada domain waktu yang bersifat diskrit. Sampel tersebut berada pada rentang 0 hingga 2π yang ekuivalen dengan 0 sampai f_s Hz. *Sampling* dilakukan dengan membagi rentang ini sedemikian rupa sehingga didapatkan data slot frekuensi berjumlah N dengan jarak yang sama. Jika N adalah panjang data sinyal yang akan dikenakan Transformasi Fourier, maka:

$$\text{unit frekuensi} = \frac{2\pi}{N} \quad (36)$$

Pada *sampling* domain waktu, T (dalam sekon) mewakili interval *sampling* antar sampel. Pada *sampling* frekuensi terdapat $2\pi/N$ yang mewakili interval *sampling* frekuensi (dalam satuan frekuensi). Frekuensi digital (θ) yang telah dilakukan *sampling* dapat diwakilkan oleh $\theta[k]$, dengan k adalah bilangan bulat yang merupakan indeks frekuensi. Pada persamaan (37) didefinisikan nilai $\theta[k]$ untuk Transformasi Fourier dengan panjang data N .

$$\theta[k] = \frac{2\pi k}{N} \quad (37)$$

Dengan mengganti θ dengan $\theta[k]$ pada persamaan (37) akan didapatkan persamaan yang dikenal dengan algoritma *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan indeks frekuensi diskrit k , sinyal input $x[n]$ dengan indeks waktu diskrit n , dan panjang data N (Park, 2010).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{n=N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (38)$$

atau lebih sering ditulis

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad (39)$$

dengan

$$W_N^{kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (40)$$

c. *Fast Fourier Transform* (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan metode DFT yang lebih efisien dalam perhitungan secara komputasi. Berawal dari DFT-N data pada persamaan (37) yang dapat dijabarkan sebagai (Proakis dan Manolakis 1996):

$$X^d[k] = x[0] + x[1]W_N^{k(1)} + x[2]W_N^{k(2)} + \dots + x[N-1]W_N^{k(N-1)} \quad (41)$$

bila $x(n)$ dikelompokkan menjadi suku genap dan ganjil, persamaan (41) dapat diubah menjadi persamaan (42).

$$X[n] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]W_N^{2nk} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1]W_N^{(2n+1)k} \quad (42)$$

Persamaan (42) dapat juga ditulis

$$X[n] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]W_N^{2nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1]W_N^{2nk} \quad (43)$$

Karena $W_N^2 = W_{\frac{N}{2}}$, persamaan (43) dapat diubah menjadi

$$X[n] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]W_{\frac{N}{2}}^{nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1]W_{\frac{N}{2}}^{nk} \quad (44)$$

dengan $k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$. Persamaan (44) dapat pula ditulis sebagai fungsi baru sebagai:

$$X[n] = G[k] + W_N^k H(k) \quad (45)$$

dengan $G[k]$ dan $H[k]$ didefinisikan pada persamaan (46) dan (47).

$$G[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n] W_{\frac{N}{2}}^{nk} \quad (46)$$

$$H[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1] W_{\frac{N}{2}}^{nk} \quad (47)$$

Karena $G[k]$ dan $H[k]$ periodik dengan periode $N/2$ akan diperoleh $G\left[k + \frac{N}{2}\right] = G[k]$ dan $H[k] = H\left[k + \frac{N}{2}\right] = H[k]$, dan karena $W_N^{k+\frac{N}{2}} = -W_N^k$ akan didapatkan persamaan (48).

$$X\left[n + \frac{N}{2}\right] = G[k] - W_N^k H(k) \quad (48)$$

Persamaan (45) dan (48) dikenal dengan FFT *radix-2 Decimation In Time* (DIT), dengan data dipilah menjadi dua bagian yaitu bagian genap dan bagian ganjil. FFT *radix-2* juga dapat didekati dengan pendekatan matrik. Persamaan (49) merupakan susunan matrik DFT untuk $N = 8$ (Van Loan, 1992).

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \\ X[4] \\ X[5] \\ X[6] \\ X[7] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_8^0 & W_8^0 & W_8^0 & W_8^0 & W_8^0 & W_8^0 & W_8^0 & W_8^0 \\ W_8^0 & W_8^1 & W_8^2 & W_8^3 & W_8^4 & W_8^5 & W_8^6 & W_8^7 \\ W_8^0 & W_8^2 & W_8^4 & W_8^6 & W_8^8 & W_8^{10} & W_8^{12} & W_8^{14} \\ W_8^0 & W_8^3 & W_8^6 & W_8^9 & W_8^{12} & W_8^{15} & W_8^{18} & W_8^{21} \\ W_8^0 & W_8^4 & W_8^8 & W_8^{12} & W_8^{16} & W_8^{20} & W_8^{24} & W_8^{28} \\ W_8^0 & W_8^5 & W_8^{10} & W_8^{15} & W_8^{20} & W_8^{25} & W_8^{30} & W_8^{35} \\ W_8^0 & W_8^6 & W_8^{12} & W_8^{18} & W_8^{24} & W_8^{30} & W_8^{36} & W_8^{42} \\ W_8^0 & W_8^7 & W_8^{14} & W_8^{21} & W_8^{28} & W_8^{35} & W_8^{42} & W_8^{49} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \\ x[3] \\ x[4] \\ x[5] \\ x[6] \\ x[7] \end{bmatrix} \quad (49)$$

Periodisitas dan kesimetrian matrik (49) dapat digambarkan sebagai sebuah fasor untuk tiap W_N^{kn} . Untuk W^8 direpresentasikan dengan sudut fasor 0

yang ditunjukkan dengan panah mengarah ke atas. Rotasi fasor searah dengan jarum jam, seperti ditunjukkan pada matrik (50) (Manolakis dan Ingle, 2011).

$$W_8 = \begin{bmatrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ \uparrow & \nearrow & \rightarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow & \leftarrow & \nwarrow \\ \uparrow & \rightarrow & \downarrow & \leftarrow & \uparrow & \rightarrow & \downarrow & \leftarrow \\ \uparrow & \searrow & \leftarrow & \nearrow & \downarrow & \nwarrow & \rightarrow & \swarrow \\ \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow \\ \uparrow & \swarrow & \rightarrow & \nwarrow & \downarrow & \nearrow & \leftarrow & \searrow \\ \uparrow & \leftarrow & \downarrow & \rightarrow & \uparrow & \leftarrow & \downarrow & \rightarrow \\ \uparrow & \nwarrow & \leftarrow & \swarrow & \downarrow & \searrow & \rightarrow & \nearrow \end{bmatrix} \quad (50)$$

Selanjutnya susunan matrik pada persamaan (49) dapat mengikuti susunan perioditas pada persamaan matrik (50), sehingga dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \\ X[4] \\ X[5] \\ X[6] \\ X[7] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \color{red}{1} & 1 & \color{red}{1} & 1 & \color{red}{1} & 1 & \color{red}{1} \\ 1 & W_8^1 & W_8^2 & W_8^3 & W_8^4 & W_8^5 & W_8^6 & W_8^7 \\ 1 & W_8^2 & W_8^4 & W_8^6 & 1 & W_8^2 & W_8^4 & W_8^6 \\ 1 & W_8^3 & W_8^6 & W_8^1 & W_8^4 & W_8^7 & W_8^2 & W_8^5 \\ 1 & W_8^4 & 1 & W_8^4 & 1 & W_8^4 & 1 & W_8^4 \\ 1 & W_8^5 & W_8^2 & W_8^7 & W_8^4 & W_8^1 & W_8^6 & W_8^3 \\ 1 & W_8^6 & W_8^4 & W_8^2 & 1 & W_8^6 & W_8^4 & W_8^2 \\ 1 & W_8^7 & W_8^6 & W_8^5 & W_8^4 & W_8^3 & W_8^2 & W_8^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ \color{red}{x[1]} \\ x[2] \\ \color{red}{x[3]} \\ x[4] \\ \color{red}{x[5]} \\ x[6] \\ \color{red}{x[7]} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Suku genap dan ganjil pada matrik (51) dapat dikelompokkan, dan dengan memasukkan nilai $W_8^4 = -1$ maka susunan matrik (51) dapat ditulis sebagai:

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \\ X[4] \\ X[5] \\ X[6] \\ X[7] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} \\ 1 & W_8^2 & W_8^4 & W_8^6 & \color{red}{W_8^1} & \color{red}{W_8^3} & \color{red}{W_8^5} & \color{red}{W_8^7} \\ 1 & W_8^4 & 1 & W_8^4 & \color{red}{W_8^2} & \color{red}{W_8^6} & \color{red}{W_8^2} & \color{red}{W_8^6} \\ 1 & W_8^6 & W_8^4 & W_8^2 & \color{red}{W_8^3} & \color{red}{W_8^1} & \color{red}{W_8^7} & \color{red}{W_8^5} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \color{red}{-1} & \color{red}{-1} & \color{red}{-1} & \color{red}{-1} \\ 1 & W_8^2 & W_8^4 & W_8^6 & \color{red}{-W_8^1} & \color{red}{-W_8^3} & \color{red}{-W_8^5} & \color{red}{-W_8^7} \\ 1 & W_8^4 & 1 & W_8^4 & \color{red}{-W_8^2} & \color{red}{-W_8^6} & \color{red}{-W_8^2} & \color{red}{-W_8^6} \\ 1 & W_8^6 & W_8^4 & W_8^2 & \color{red}{-W_8^3} & \color{red}{-W_8^1} & \color{red}{-W_8^7} & \color{red}{-W_8^5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[2] \\ x[4] \\ x[6] \\ \color{red}{x[1]} \\ \color{red}{x[3]} \\ \color{red}{x[5]} \\ \color{red}{x[7]} \end{bmatrix} \quad (52)$$

persamaan (52) dapat dipecah menjadi dua bagian sehingga ditulis menjadi persamaan (53).

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \\ X[4] \\ X[5] \\ X[6] \\ X[7] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W_8^2 & W_8^4 & W_8^6 \\ 1 & W_8^4 & 1 & W_8^4 \\ 1 & W_8^6 & W_8^4 & W_8^2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W_8^2 & W_8^4 & W_8^6 \\ 1 & W_8^4 & 1 & W_8^4 \\ 1 & W_8^6 & W_8^4 & W_8^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[2] \\ x[4] \\ x[6] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ W_8^1 & W_8^3 & W_8^5 & W_8^7 \\ W_8^2 & W_8^6 & W_8^2 & W_8^6 \\ W_8^3 & W_8^1 & W_8^7 & W_8^5 \\ -W_8^1 & -W_8^3 & -W_8^5 & -W_8^7 \\ -W_8^2 & -W_8^6 & -W_8^2 & -W_8^6 \\ -W_8^3 & -W_8^1 & -W_8^7 & -W_8^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[1] \\ x[3] \\ x[5] \\ x[7] \end{bmatrix} \quad (53)$$

Dengan cara yang sama, dapat pula disusun FFT *radix*-4. Persamaan DFT untuk panjang data N dibagi menjadi empat bagian sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X[n] = & \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n] W_N^{4nk} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+1] W_N^{(4n+1)k} \\ & + \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+2] W_N^{(4n+2)k} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+3] W_N^{(4n+3)k} \end{aligned} \quad (54)$$

Selanjutnya persamaan (54) di atas dapat diuraikan menjadi:

$$\begin{aligned} X[n] = & \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n] W_N^{4nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+1] W_N^{4nk} \\ & + W_N^{2k} \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+2] W_N^{4nk} + W_N^{3k} \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+3] W_N^{4nk} \end{aligned} \quad (55)$$

Dengan adanya definisi $W_N^4 = W_{N/4}$ persamaan (55) dapat diubah menjadi:

$$\begin{aligned} X[n] = & \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n] W_{\frac{N}{4}}^{nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+1] W_{\frac{N}{4}}^{nk} \\ & + W_N^{2k} \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+2] W_{\frac{N}{4}}^{nk} + W_N^{3k} \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} x[4n+3] W_{\frac{N}{4}}^{nk} \end{aligned} \quad (56)$$

Bila didekati dengan matrik, *radix*-4 dihasilkan melalui pengelompokan kembali suku ganjil dan genap pada matrik *radix*-2 pada persamaan (52) sehingga didapatkan persamaan (57).

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \\ X[4] \\ X[5] \\ X[6] \\ X[7] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W_8^4 & W_8^2 & W_8^6 & W_8^1 & W_8^5 & W_8^3 & W_8^7 \\ 1 & 1 & W_8^4 & W_8^4 & W_8^2 & W_8^2 & W_8^6 & W_8^6 \\ 1 & W_8^4 & W_8^6 & W_8^2 & W_8^3 & W_8^7 & W_8^1 & W_8^5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & W_8^4 & W_8^2 & W_8^6 & -W_8^1 & -W_8^5 & -W_8^3 & -W_8^7 \\ 1 & 1 & W_8^4 & W_8^4 & -W_8^2 & -W_8^2 & -W_8^6 & -W_8^6 \\ 1 & W_8^4 & W_8^6 & W_8^2 & -W_8^3 & -W_8^7 & -W_8^1 & -W_8^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[4] \\ x[2] \\ x[6] \\ x[1] \\ x[5] \\ x[3] \\ x[7] \end{bmatrix} \quad (57)$$

Selanjutnya persamaan matrik (58) dapat dipecah menjadi

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \\ X[4] \\ X[5] \\ X[6] \\ X[7] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & W_8^4 \\ 1 & 1 \\ 1 & W_8^4 \\ 1 & 1 \\ 1 & W_8^4 \\ 1 & 1 \\ 1 & W_8^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[4] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ W_8^2 & W_8^6 \\ W_8^4 & W_8^4 \\ W_8^6 & W_8^2 \\ 1 & 1 \\ W_8^2 & W_8^6 \\ W_8^4 & W_8^4 \\ W_8^6 & W_8^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[2] \\ x[6] \end{bmatrix} \\
+ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ W_8^1 & W_8^5 \\ W_8^2 & W_8^2 \\ W_8^3 & W_8^7 \\ -1 & -1 \\ -W_8^1 & -W_8^5 \\ -W_8^2 & -W_8^2 \\ -W_8^3 & -W_8^7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[1] \\ x[5] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ W_8^3 & W_8^7 \\ W_8^6 & W_8^6 \\ W_8^1 & W_8^5 \\ -1 & -1 \\ -W_8^3 & -W_8^7 \\ -W_8^6 & -W_8^6 \\ -W_8^1 & -W_8^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[3] \\ x[7] \end{bmatrix} \quad (58)$$

7. Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA)

Percepatan adalah parameter yang menyatakan perubahan kecepatan mulai dari keadaan diam sampai kecepatan tertentu. Percepatan getaran tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration (PGA)* adalah nilai percepatan getaran oleh gelombang gempabumi. Nilai percepatan tanah maksimum dihitung berdasarkan magnitudo dan jarak sumber gempa yang pernah terjadi terhadap titik perhitungan, serta nilai periode dominan tanah daerah tersebut (Fauzi dalam Edwiza, 2008).

Percepatan tanah permukaan di suatu tempat yang disebabkan oleh getaran seismik bergantung pada perambatan gelombang seismik dan karakteristik lapisan tanah (*alluvial deposit*) di tempat tersebut (Kanai, 1983). Sifat-sifat lapisan tanah mempengaruhi periode dominan tanah dari lapisan tanah tersebut bila ada getaran seismik. Periode dominan tanah akan mempengaruhi besarnya percepatan batuan pada lapisan batuan dasar (*base rock*) dan pada permukaan (*ground surface*). Berdasarkan besarnya nilai periode dominan (T_0), dapat diketahui perbedaan karakteristik tanah dan geologi di daerah penelitian seperti pada Tabel 1. Perbedaan respon seismik pada batuan dasar dengan respon seismik pada permukaan tanah akan menentukan faktor perbesaran $G(T)$.

Tabel 1. Klasifikasi tanah konversi Kanai & Tanaka dengan Omote-Nakajima (Gunawan dan Subardjo, 2005; Pitilakis *et al.*, 2004).

Klasifikasi Tanah		Periode dominan (detik)	Frekuensi dominan (Hz)	Keterangan
Kanai	Omote-Nakajima			
Jenis I	Jenis A	0,05-0,15	6,7-20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan pasir berkerikil keras (<i>hard sandy gravel</i>)
Jenis II	Jenis B	0,10-0,25	4-6,7	Batuan alluvial dengan ketebalan 5m. Terdiri dari pasir kerikil(<i>sandy gravel</i>), lempung keras berpasir (<i>sandy hard clay</i>), lempung (<i>loam</i>), dan sebagainya.
Jenis III	Jenis C	0,25-0,40	2,5-4	Batuan alluvial yang hampir sama dengan tanah jenis II, hanya dibedakan oleh adanya formasi yang belum diketahui (<i>buff formation</i>)
Jenis IV	Jenis D	>0,40	1,4-2,5	Batuan alluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, <i>top soil</i> , lumpur, tanah

				lunak, humus, endapan delta atau endapan lumpur, yang tergolong ke dalam tanah lembek, dengan kedalaman 30m.
--	--	--	--	--

Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, Kanai memformulasikan sebuah rumus empiris percepatan tanah pada permukaan (Edwiza, 2008) yang dirumuskan sebagai:

$$a_g = G(T)a_0 \quad (59)$$

dengan

$$a_0 = \frac{1}{T} 10^{((0,61M) - (1,66 + \frac{3,66}{R}) \log R + 0,167 - \frac{1,83}{R})} \quad (60)$$

dan

$$G(T) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{0,2 T}{\sqrt{T_0 T_0}}\right)^2}} \quad (61)$$

dengan $G(T)$ adalah faktor perbesaran, a_0 adalah percepatan tanah pada *base rock* (gal), a_g menyatakan nilai percepatan tanah di titik pengukuran (gal), T adalah periode gelombang gempa (s), T_0 periode dominan tanah titik pengukuran (s), M adalah magnitudo gempabumi (Skala Richter) dan R jarak hiposenter (km).

Bila terjadi resonansi ($T = T_0$) maka harga $G(T)$ akan mencapai maksimum. Gelombang yang melalui lapisan sedimen akan menimbulkan resonansi yang disebabkan karena gelombang gempa mempunyai spektrum yang lebar sehingga hanya gelombang gempa yang sama dengan periode dominan tanah dari lapisan sedimen yang akan diperkuat. Dengan besarnya

harga perbesaran $G(T)$ maka percepatan tanah pada permukaan akan menjadi maksimum yang dapat ditulis dengan persamaan:

$$a_g = \frac{5}{\sqrt{T_0}} 10^{((0,61M) - (1,66 + \frac{3,66}{R}) \log R + 0,167 - \frac{1,83}{R})} \quad (62)$$

7. *Ground Shear Strain* (γ)

Nilai *Ground Shear Strain* (GSS) pada lapisan tanah menggambarkan kemampuan material lapisan tanah untuk bergeser saat terjadi gempa bumi. Tabel 2 menunjukkan hubungan GSS terhadap bencana yang diakibatkan oleh tanah. Dari data tersebut diketahui bahwa saat GSS bernilai 1000×10^{-6} , tanah mulai menunjukkan karakter yang tidak linier dan saat GSS bernilai lebih dari 10.000×10^{-6} , tanah akan mengalami deformasi dan keruntuhan (Nakamura, 1997).

Tabel 2. Hubungan antara regangan dengan sifat dinamis tanah (Nakamura, 1997).

Nilai regangan (γ)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Fenomena	Gelombang, Getaran	Retak, Penurunan tanah		Longsor, Penurunan tanah, Likuifaksi		
Sifat dinamis	Elastis	Plastik elastis		Keruntuhan		
				Efek ulangan, efek kelajuan dari pemuatan		

Besarnya *Ground Shear Strain* (γ) dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\gamma = (A_g d) / H \quad (63)$$

dengan A_g adalah faktor amplifikasi, H adalah ketebalan lapisan tanah, dan d adalah pergeseran gelombang seismik di bawah permukaan tanah. Kecepatan

pergeseran gelombang di bawah permukaan tanah dan pada permukaan tanah masing-masing dilambangkan sebagai V_b dan V_s . Besarnya kecepatan gelombang di bawah permukaan tanah (V_b) dirumuskan sebagai

$$V_b = 4A_g H f_0 \quad (64)$$

sehingga besarnya ketebalan lapisan dapat ditentukan dengan persamaan

$$H = V_b / 4A_g f_0 \quad (65)$$

Nilai ketebalan lapisan dapat pula dituliskan sebagai

$$H = V_s / 4f_0 \quad (66)$$

dengan $V_s = V_b / A_g$.

Percepatan di bawah permukaan tanah (a_g) dinyatakan sebagai:

$$a_g = (2\pi f_0)^2 d \quad (67)$$

sehingga perpindahan seismik dari bawah permukaan tanah dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$d = a_g / (2\pi f_0)^2 \quad (68)$$

Jika Persamaan (66) dan Persamaan (67) dimasukkan ke Persamaan (63), maka diperoleh:

$$\gamma = (A_g a_g / (2\pi f_0)^2) / (V_s / 4f_0) \quad (69)$$

$$\gamma = (A_g a_g) / (\pi^2 V_s f_0) \quad (70)$$

Sehingga persamaan *Ground Shear Strain* (γ) adalah:

$$\gamma = (K_g a_g) \quad (71)$$

dengan K_g adalah indeks kerentanan seismik tanah:

$$K_g = (A_g/f_0)/(\pi^2 V_s) \quad (72)$$

Pada saat nilai γ di atas 10^{-2} tanah akan mengalami fenomena tanah longsor dan likuifaksi. Terjadinya tanah longsor pada umumnya disebabkan oleh hujan, lereng terjal, getaran (seperti gempabumi) dan sebagainya (Nandi, 2006). Sedangkan likuifaksi merupakan fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran gempa. Likuifaksi terjadi pada tanah yang berpasir lepas (tidak padat) dan jenuh air (Towhata dalam Alwyn, 2013).

Saat likuifaksi terjadi, lapisan pasir berubah menjadi seperti cairan sehingga tak mampu menopang beban bangunan di dalam atau di atasnya. Lapisan tanah yang peka terhadap kejadian likuifaksi umumnya dibentuk dalam lingkungan geologi kuarter (Seed dan Idris dalam Alwyn, 2013). Secara spesifik, umumnya berhubungan dengan endapan sedimen kuarter seperti aliran sungai, lembah daratan kuarter, sejarah pasang surut daratan, rawa, payau, estuari, pantai, endapan danau, dan endapan gumuk pasir lepas. Material lapisan tanah dibentuk oleh proses pergerakan sehingga mengalami pemisahan dan membentuk distribusi ukuran butir seragam dalam kondisi lepas yang memungkinkan terjadinya proses likuifaksi.

9. Mikrozonasi

Mikrozonasi adalah upaya untuk mengevaluasi dan memetakan potensi bencana di suatu daerah, khususnya daerah perkotaan, yang pada umumnya disebabkan oleh getaran tanah yang kuat selama gempabumi (Bertero dalam

Laberta, 2014). Bahaya ini meliputi: amplifikasi gerakan tanah, likuifaksi dan potensial tanah longsor.

Peta mikrozonasi dapat digunakan untuk menggambarkan potensi terjadinya bahaya bencana alam. Peta potensi tanah longsor juga dapat dibuat jika pergerakan tanah batuan dasar diketahui. Peta mikrozonasi dapat dibuat dengan menggunakan beberapa *software*. Salah satu *software* yang dapat digunakan untuk membuat peta mikrozonasi yaitu *software* Surfer 10.

B. Penelitian yang Relevan

Rosita (2013) melakukan penelitian tentang *Ground Shear Strain* di wilayah Kecamatan Jetis, Kabupaten Bantul. Dalam penelitiannya, peneliti menggunakan data mikrotremor dan diolah dengan metode *HVSR*. Hasil dari penelitian tersebut adalah Kecamatan Jetis memiliki nilai *Ground Shear Strain* $(1,2 - 6,0) \times 10^{-4}$. Fenomena yang mungkin terjadi di Kecamatan Jetis adalah getaran tanah, rekahan tanah, dan penurunan tanah.

Abu Bakri (2014) melakukan penelitian tentang *Ground Shear Strain* di wilayah Kabupaten Kulonprogo. Dalam penelitiannya, peneliti menggunakan data mikrotremor dan diolah dengan metode *HVSR*. Hasil dari penelitian tersebut adalah Kabupaten Kulonprogo memiliki nilai *Ground Shear Strain* $(5,8 \times 10^{-5} - 1,6 \times 10^{-3})$. Fenomena yang mungkin terjadi di Kabupaten Kulonprogo adalah getaran tanah, rekahan tanah, dan penurunan tanah.

C. Kerangka Pikir

Data yang diperoleh dari penelitian di sepanjang jalur Sesar Opak berupa data mikrotremor. Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode HVSR. *Windowing* dan *cutting* dari dua komponen sinyal dilakukan dengan *software* Geopsy. Untuk menentukan rasio spektrum dari komponen horizontal dengan komponen vertikal digunakan *software* Matlab 2010a. Hasil yang didapatkan dari *software* Matlab 2010a adalah frekuensi dominan dan *amplitude* rasio HVSR di setiap titik pengambilan data. Untuk mengetahui nilai *Ground Shear Strain* (GSS) dari hasil penelitian digunakan Persamaan (71). Sebelum menentukan GSS maka ditentukan terlebih dahulu nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dengan Persamaan (72) dan percepatan getaran tanah maksimum (PGA) dengan Persamaan (62). Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai percepatan gerakan tanah maksimum adalah persamaan pada metode Kanai. Untuk menentukan fenomena yang terjadi, data GSS harus dikolaborasikan dengan data topografi yang dipetakan dengan *software* Surfer 10.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian telah dilakukan pada bulan Januari sampai November 2016. Pengambilan data telah dilakukan pada tanggal 22 sampai 26 Januari 2016. Telah dilakukan studi literatur dan diskusi yang dimulai pada bulan Oktober 2015. Pengambilan data primer berupa pengukuran sinyal mikrotremor secara langsung di jalur Sesar Opak dari Kecamatan Bambanglipuro Kabupaten Bantul sampai dengan Kecamatan Kalasan Kabupaten Sleman sebanyak 39 titik penelitian. Setiap titik diberikan jarak 2 km, pengukuran dilakukan selama 30 menit untuk setiap titik dengan frekuensi *sampling* 100 Hz.

B. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian berupa variabel bebas dan variabel terikat. Adapun variabelnya adalah sebagai berikut:

Variabel terikat : Faktor Amplifikasi (A), Frekuensi Predominan (f_o), Kecepatan Gelombang Geser di Permukaan (V_s), Indeks Kerentanan Seismik (K_g), Percepatan Tanah Maksimum (a_b), *Ground Shear Strain* (γ).

Variabel bebas : Lokasi Titik.

C. Instrumen Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa perangkat keras dan perangkat lunak. Adapun perangkatnya adalah sebagai berikut:

1. Perangkat keras (*Hardware*)

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini (ditunjukkan pada Gambar 12) adalah

- a. *Digital Portable Seismograph* tipe TDL-303S, digunakan untuk merekam getaran tanah pada setiap titik penelitian.
- b. Seismometer tipe TDV-23S, digunakan untuk mengukur getaran tanah pada setiap titik penelitian.
- c. *Global Positioning System* (GPS) digunakan untuk menentukan posisi pada setiap titik penelitian.
- d. Kabel, untuk menghubungkan *Digital Portable Seismograph* dengan seismometer.
- e. Kompas, digunakan untuk menentukan arah pada saat memasang seismometer.
- f. Laptop, digunakan untuk akuisisi dan analisis data mikrotremor.
- g. Lembar *check list* survei mikrotremor, untuk catatan penelitian.



Gambar 12. Satu set seismograf TDL-303S (1.*Global Positioning System*, 2.Kabel, 3.Seismometer, 4.*Digital Portable Seismograph*).

2. Perangkat Lunak (*Software*)

Adapun perangkat lunak yang digunakan adalah sebagai berikut :

- a. Google Earth berfungsi untuk memperkirakan kondisi lokasi penelitian dan menentukan titik pengambilan data.
- b. Global Mapper 13 berfungsi untuk memasukkan koordinat pengambilan data ke perangkat GPS.
- c. Sessary Geopsy berfungsi untuk pemilihan sinyal tanpa *noise* dari data mikrotremor dengan melakukan *windowing* dan *cutting*.
- d. MATLAB R2010a berfungsi untuk menganalisis data mikrotremor dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT).
- e. Surfer 12 digunakan untuk membuat mikrozonasi.
- f. Microsoft Excel 2010 berfungsi untuk mengubah format data DAT (.dat) menjadi format data kolom Excel Workbook (.xls).

D. Teknik Pengumpulan Data

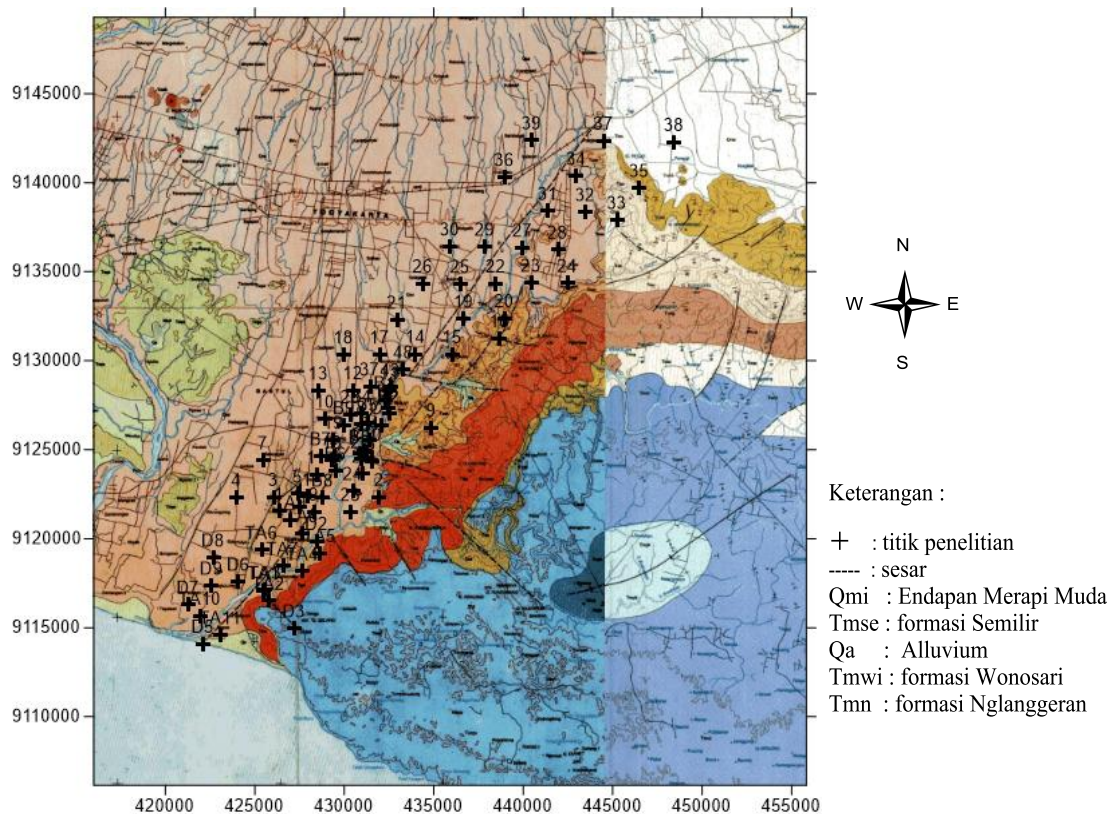
Tahapan yang dilakukan sebelum pengambilan data mikrotremor di lokasi penelitian adalah membuat desain survei untuk menentukan lokasi pengambilan data mikrotremor. Titik sampel penelitian terdapat di sekitar jalur Sesar Opak. Desain survei dibuat dengan mengacu pada peta geologi Yogyakarta dengan skala 1:100.000. Setelah lokasi titik sampel ditentukan, tahap berikutnya dilakukan survei lokasi pengambilan data untuk mempermudah proses saat pengambilan data. Pengambilan data sesuai dengan persyaratan teknis SESAME. Adapun teknis survei mikrotremor dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3. Persyaratan teknis survei mikrotremor (SESAME, 2004).

Parameter	Saran yang dianjurkan	
Durasi Pencatatan	f_g minimum yang diharapkan (Hz)	Durasi pencatatan minimum yang disarankan (menit)
	0,2	30
	0,5	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
<i>Coupling soil-sensor alami</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mengatur sensor langsung pada permukaan tanah. • Tidak menempatkan sensor seismograf pada permukaan tanah lunak (lumpur, semak-semak) atau tanah lunak setelah hujan. 	
<i>coupling soil-sensor buatan</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Menghindari lempengan yang terbuat dari material lunak seperti karet atau busa. • Memasang sensor dalam timbunan pasir atau wadah yang diisi pasir untuk kemiringan yang curam dimana sulit mendapatkan level sensor yang baik. 	
Keberadaan bangunan atau pohon	<ul style="list-style-type: none"> • Menghindari pengukuran dekat dengan bangunan, gedung bertingkat, dan pohon yang tinggi, jika terdapat tiupan angin di atas ± 5 m/s. Kondisi ini sangat mempengaruhi hasil analisis HVSR yang ditunjukkan dengan kemunculan frekuensi rendah pada kurva. Menghindari pengukuran di lokasi tempat parkir, pipa air, dan gorong-gorong. 	
Kondisi cuaca	<ul style="list-style-type: none"> • Angin: melindungi sensor jika kecepatan angin di atas ± 5 m/s. • Hujan: menghindari pengukuran di bawah terpaan hujan lebat, kecuali hujan ringan, karena tidak akan berpengaruh. • Temperatur: memeriksa sensor seismograf dan mencatat instruksi pabrik. 	
Gangguan	<ul style="list-style-type: none"> • Sumber monokromatik: menghindari pengukuran mikrotremor dekat dengan mesin, industri, pompa air, dan generator yang sedang beroperasi. • Sumber sementara: jika terdapat sumber getar transient (jejak langkah kaki, mobil lewat, motor lewat) tingkatkan durasi pengukuran untuk memberikan jendela yang cukup untuk analisis setelah gangguan tersebut hilang. 	

Pengambilan data mikrotremor di 39 Titik Amat (TA) digunakan sebagai data primer dalam penelitian. Kemudian terdapat tambahan data sekunder sebanyak 46 TA yang sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya dari BMKG. Ploting lokasi data primer dan sekunder ditunjukkan pada Gambar 13.

Penentuan titik amat yang berjarak 2 km antara setiap titik dikarenakan setiap lokasi memiliki frekuensi dominan dan amplitudo yang berbeda, sehingga akan memberikan pengaruh terhadap besar atau kecilnya nilai percepatan getaran tanah maksimum dan indeks kerentanan seismik di jalur Sesar Opak dari Kecamatan Bambanglipuro Kabupaten Bantul sampai dengan Kecamatan Kalasan Kabupaten Klaten.



Gambar 13. Peta Lokasi Pengambilan Data.

E. Teknik Analisis Data

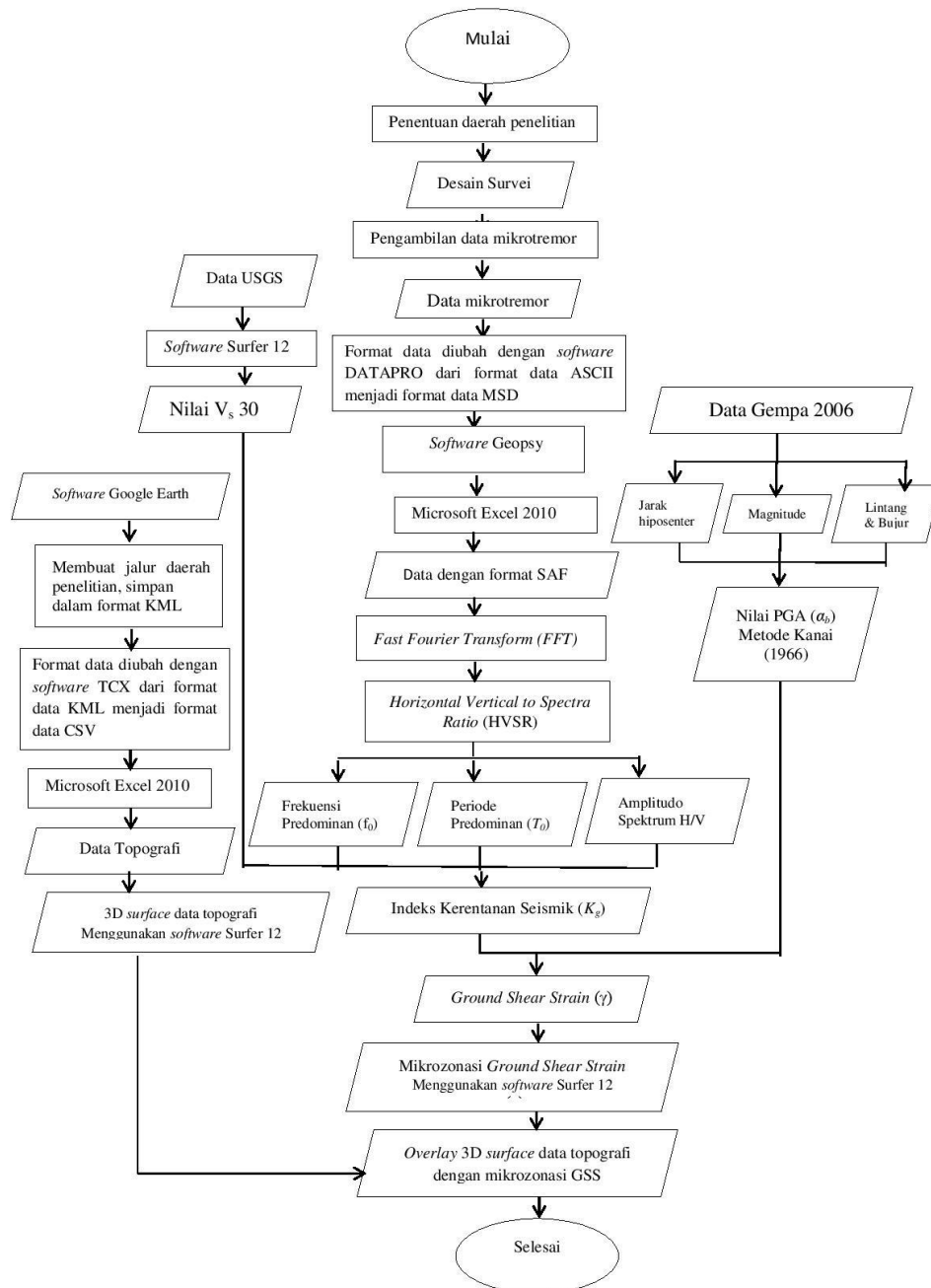
Tahapan berikutnya setelah proses pengumpulan data adalah proses analisis data. Analisis data dalam penelitian ini menggunakan metode HVSR. Dari data mikrotremor terdapat 2 komponen sinyal yaitu komponen vertikal dan

horizontal, sedangkan komponen horizontal terdiri dari horizontal utara-selatan dan barat-timur. Data mikrotremor dianalisis dengan Sessary Geopsy yaitu dengan melakukan *windowing* dan *cutting* untuk pemilihan sinyal tanpa *noise*. Analisis selanjutnya menggunakan program Matlab 2010a dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk memperoleh grafik HVSR. Hasil dari analisis digunakan untuk menentukan nilai GSS (γ).

Dalam menentukan nilai GSS diperlukan nilai indeks kerentanan seismik dan juga nilai percepatan tanah *basement*. Nilai frekuensi dominan (f_0) dan nilai faktor amplifikasi (A_g) yang diperoleh dari analisis HVSR digunakan sebagai data masukan untuk menghitung nilai kerentanan seismik (K_g). Percepatan tanah (a_b) diperoleh dengan cara memasukkan parameter gempa berupa periode dominan (T_0), magnitudo (M), lintang-bujur dan jarak hiposenter (R). Selanjutnya dilakukan mikrozonasi nilai GSS (γ). Fenomena yang terjadi berdasarkan nilai GSS (γ) dapat diprediksi dari tabel hubungan antara regangan dengan sifat dinamis tanah. Setelah mikrozonasi didapatkan kemudian menghubungkannya dengan data elevasi Sesar Opak untuk pemodelan 3D *surface* menggunakan program Surfer 12.

F. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 14:



Gambar 14. Diagram Alir.

BAB IV

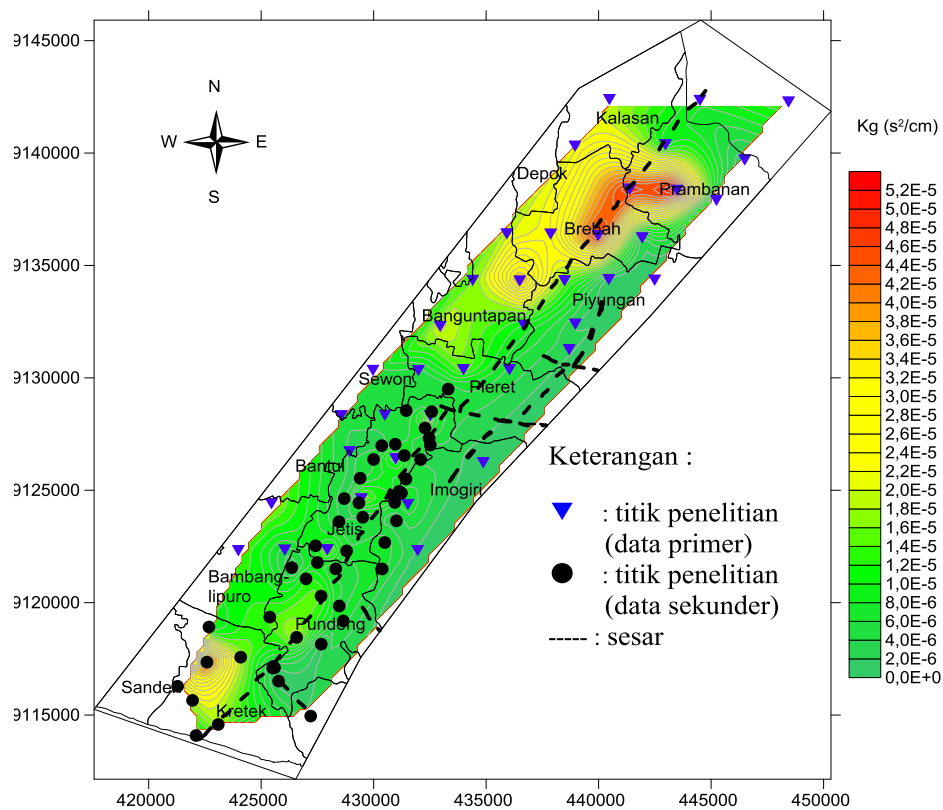
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengukuran mikrotremor diperoleh nilai GSS (*Ground Shear Strain*) di sepanjang jalur Sesar Opak dan mikrozonasi GSS (γ) di sepanjang jalur Sesar Opak. Nilai GSS berdasarkan penelitian ini berkisar antara $(3,9 \times 10^{-5} - 5,3 \times 10^{-3})$. Semakin besar nilai GSS menyebabkan lapisan tanah mengalami deformasi seperti likuifaksi, rekahan tanah, dan longsor. Semakin kecil nilai GSS menunjukkan lapisan batuan semakin kokoh dan sulit terjadi deformasi (Rosita, 2013). Nilai GSS dipengaruhi oleh nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dan nilai percepatan tanah maksimum (α_b), karena nilainya saling berbanding lurus. Semakin besar nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dan nilai percepatan tanah maksimum (α_b), maka nilai GSS akan semakin tinggi juga.

Nilai indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh faktor amplifikasi, frekuensi dominan, dan nilai kecepatan gelombang di permukaan. Nilai frekuensi dominan dan kecepatan gelombang berbanding terbalik dengan nilai indeks kerentanan seismik, sedangkan faktor amplifikasi berbanding lurus dengan nilai indeks kerentanan seismik. Semakin besar nilai frekuensi dominan dan kecepatan gelombang maka akan semakin kecil nilai indeks kerentanan seismik, sedangkan semakin besar nilai faktor amplifikasi maka semakin besar nilai indeks kerentanan seismik. Indeks kerentanan seismik menunjukkan kestabilan struktur tanah, dimana semakin besar indeks kerentanan seismik maka kestabilan struktur

tanah semakin kecil, sehingga kerusakan yang akan terjadi apabila terjadi gempa bumi akan semakin besar.

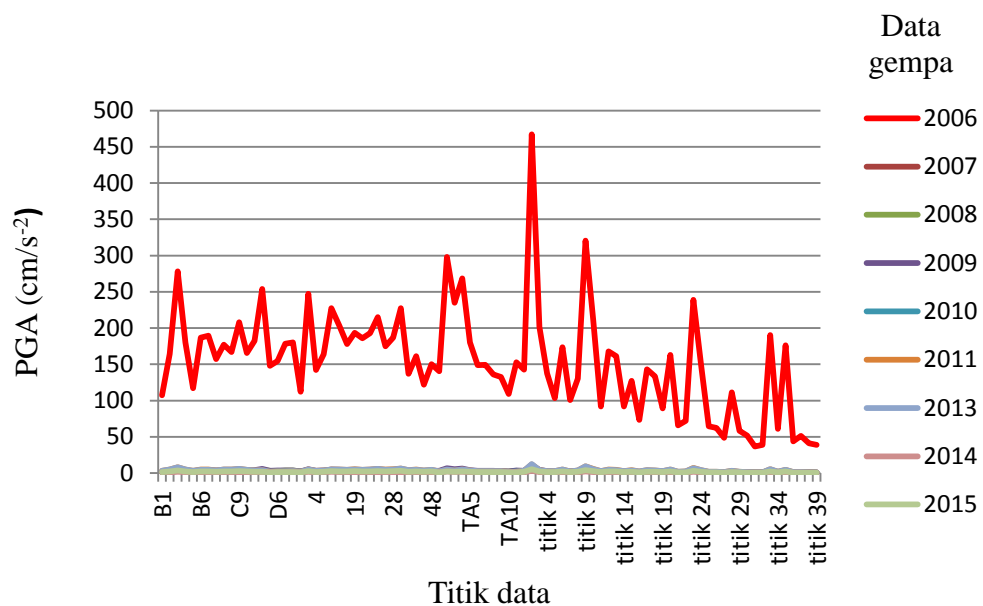
Nilai indeks kerentanan seismik di sepanjang jalur Sesar Opak berkisar antara $(2,0 \times 10^{-7} - 5,4 \times 10^{-5} \text{ s}^2/\text{cm})$. Untuk nilai indeks kerentanan seismik tertinggi berada pada kawasan Prambanan dan terendah berada pada kawasan Piyungan. Berdasarkan data analisis yang diperoleh, dapat dibuat mikrozonasi indeks kerentanan seismik yang ditunjukkan pada Gambar 15. Nilai indeks kerentanan seismik yang bernilai di bawah $2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^2/\text{cm}$ ditunjukkan dengan warna hijau tua. Nilai indeks kerentanan seismik yang bernilai di atas $5,2 \times 10^{-5} \text{ s}^2/\text{cm}$ ditunjukkan dengan warna merah.



Gambar 15. Mikrozonasi nilai Indeks Kerentanan Seismik.

Nilai percepatan tanah maksimum (PGA) dipengaruhi oleh magnitudo (M), jarak hiposenter (R) dan koordinat gempa. Semakin besar nilai PGA maka akan semakin cepat pula tanah mengalami pergerakan apabila ada sumber gempa dan sebaliknya semakin kecil nilai PGA maka akan semakin lambat pergerakan atau perubahan kecepatan apabila ada sumber gempa.

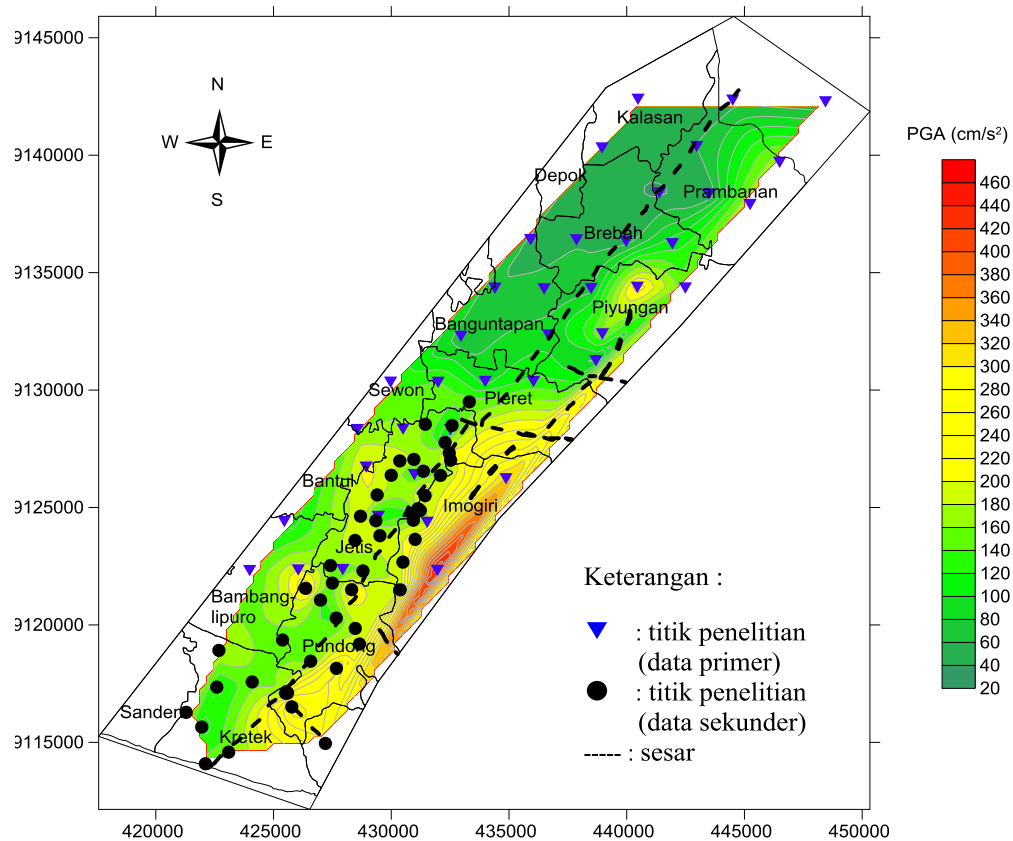
Sumber gempa yang digunakan adalah data gempa yang terjadi selama 9 tahun, kemudian diperoleh nilai PGA yang terbesar di setiap titiknya. Berdasarkan data kegempaan, nilai PGA yang lebih dominan adalah data gempa Bantul 27 Mei tahun 2006 dengan kekuatan gempa 5,9 SR dan jarak hiposenter 12 km. Grafik nilai PGA dari tahun 2006 hingga tahun 2015 dapat ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Grafik nilai PGA di sepanjang jalur Sesar Opak berdasarkan sumber gempabumi Yogyakarta 2006 sampai dengan 2015.

Dengan demikian, perhitungan nilai PGA dengan metode Kanai (1966) mengacu pada gempabumi Yogyakarta 27 Mei 2006 yang terjadi kurang lebih

pukul 05.55 WIB dengan kekuatan 5,9 SR selama 57 detik pada pusat gempa 8.00° LS – 110.31° BT (37,2 km selatan Kota Yogyakarta, kedalaman 12 km). Berdasarkan data gempa tahun 2006 ini diperoleh nilai PGA di sepanjang jalur Sesar Opak berkisar $36,8 \text{ cm/s}^2$ – $467,1 \text{ cm/s}^2$ yang kemudian dapat dibuat mikrozonasi nilai percepatan gerakan tanah maksimum seperti ditunjukkan oleh Gambar 17.

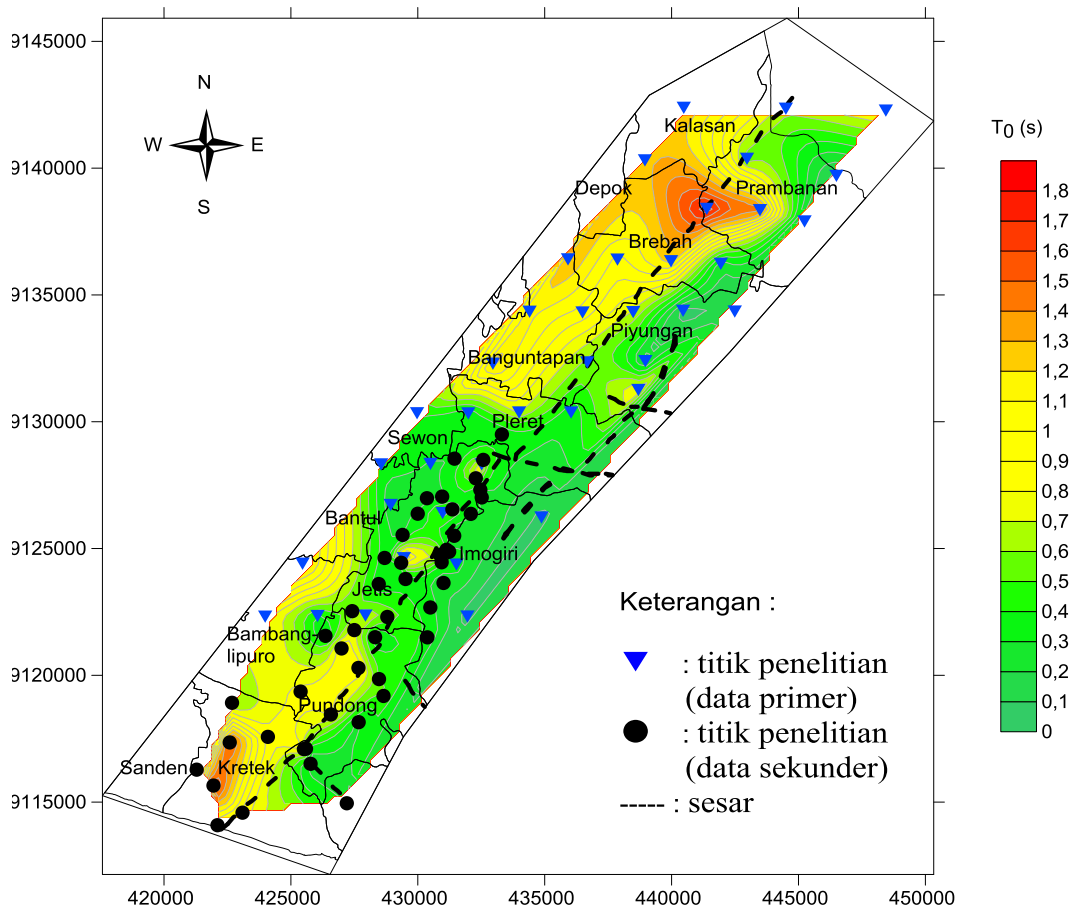


Gambar 17. Mikrozonasi nilai Percepatan Tanah Maksimum (PGA).

Pada Gambar 17 dapat dilihat bahwa PGA yang bernilai di bawah $36,8 \text{ cm/s}^2$ ditunjukkan dengan warna hijau tua dan yang bernilai di atas $467,1 \text{ cm/s}^2$ ditunjukkan dengan warna merah. Untuk nilai PGA tertinggi berada

pada titik amat 2 (di kawasan Imogiri) dan terendah berada pada titik amat 31 (di kawasan Prambanan).

Percepatan tanah permukaan di suatu tempat yang disebabkan oleh getaran seismik bergantung pada perambatan gelombang seismik dan karakteristik lapisan tanah (*alluvial deposit*) di tempat tersebut (Kanai, 1966). Besarnya nilai periode dominan tanah (T_0) mempengaruhi besarnya nilai PGA. Nilai periode dominan (T_0) diperoleh dari frekuensi dominan (f_0) dengan f_0 merupakan hasil dari pengukuran mikrotremor. Mikrozonasi periode dominan (T_0) ditunjukkan pada Gambar 18.



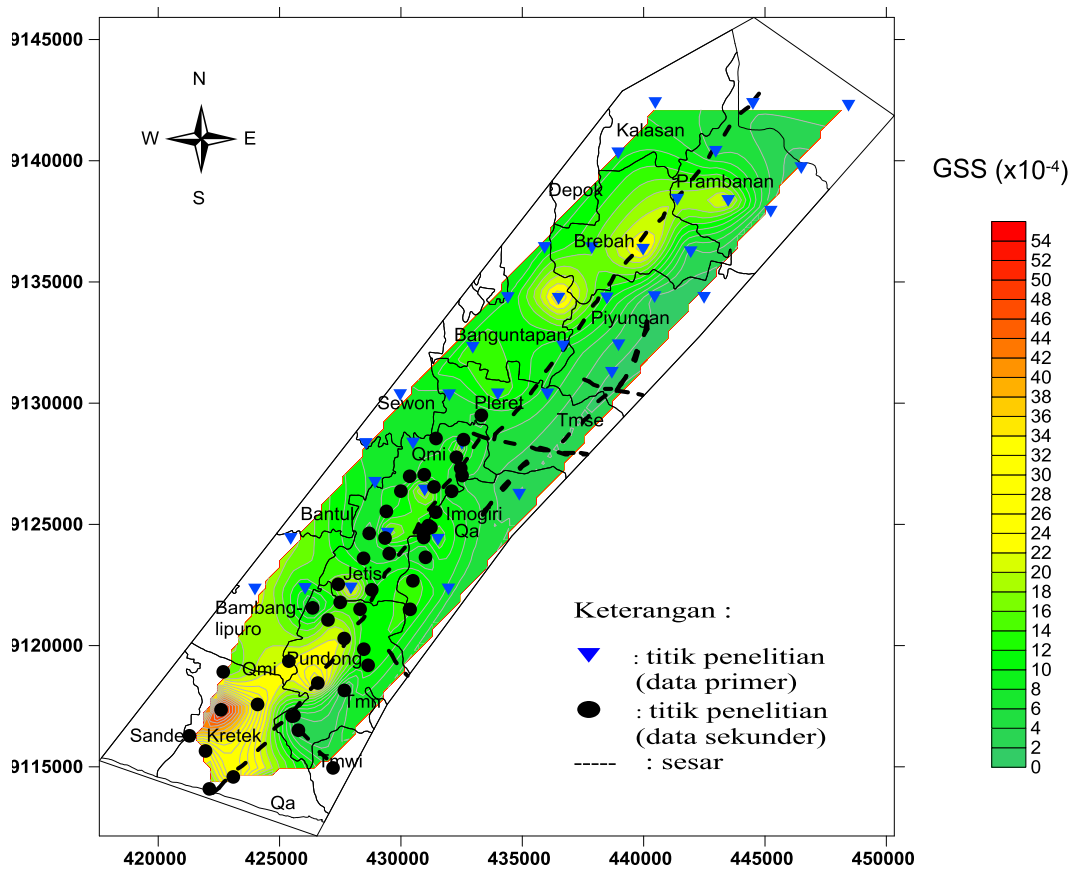
Gambar 18. Mikrozonasi nilai Periode Predominan (T_0).

Hubungan nilai T_0 berbanding terbalik dari nilai PGA, saat nilai T_0 rendah maka nilai PGA besar dan sebaliknya, sesuai dengan persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai PGA pada persamaan (60). Semakin besar nilai PGA semakin besar pula nilai GSS, karena berbanding lurus antara nilai PGA dan nilai GSS.

Nilai GSS mempengaruhi kemungkinan suatu wilayah mengalami kerusakan saat terjadi gempa, karena pengertian GSS sendiri adalah kemampuan suatu material untuk menggeser atau meregang pada saat terjadi gempabumi. Oleh karena itu pendekatan nilai GSS ini sangat penting, dimana semakin besar nilai GSS maka akan semakin besar pula kemungkinan kerusakan suatu wilayah pada saat gempabumi dan sebaliknya semakin kecil nilai GSS maka semakin kecil pula kemungkinan kerusakan yang terjadi di suatu wilayah pada saat gempabumi. Sesuai tabel klasifikasi nilai GSS dengan sifat dinamis tanah pada Tabel 2, saat nilai GSS $10^{-6} - 10^{-5}$ akan terjadi gelombang dan getaran, saat nilai GSS $10^{-4} - 10^{-3}$ akan terjadi retak dan penurunan tanah, kemudian saat nilai GSS di atas 10^{-3} akan terjadi tanah longsor pada wilayah yang memiliki topografi kelerengan tinggi dan likuifaksi pada wilayah yang memiliki dataran rendah dan cekungan.

Berdasarkan klasifikasi fenomena, nilai GSS sepanjang jalur Sesar Opak belum berada di atas 10^{-3} , sehingga fenomena yang terjadi akibat gempa tidak sampai terjadi tanah longsor ataupun likuifaksi. Mikrozonasi nilai GSS ditunjukkan pada Gambar 19. Daerah yang memiliki nilai GSS terendah berada di

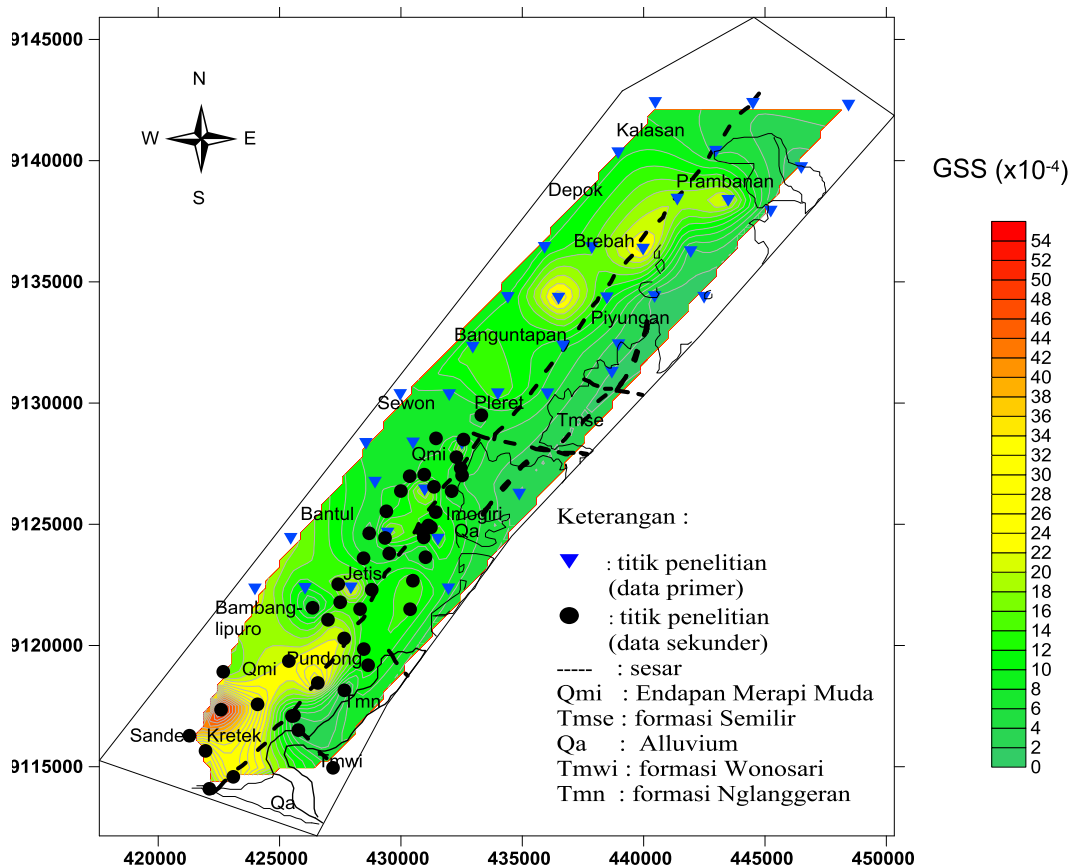
kawasan Piyungan dan daerah yang memiliki nilai GSS tertinggi berada di kawasan Sanden.



Gambar 19. Mikrozonasi nilai GSS.

Saat nilai magnitudo berada di atas 7,0 SR sehingga nilai GSS sepanjang jalur Sesar Opak mencapai nilai di atas 10^{-3} , maka fenomena yang mungkin muncul adalah tanah longsor dan likuifaksi. Fenomena akibat gempabumi tidak lepas dari faktor geologi. Sebagian besar jalur Sesar Opak memiliki geologi berupa tanah lempung dan pasir yang tergolong lunak dibandingkan andesit dan breksi vulkanik. Kondisi geomorfologi pada lokasi penelitian termasuk ke dalam bentuk lahan fluvio-vulkanik (bentuk lahan dari proses fluvial dan hasil bahan gunung api) dan struktural. Daerah penelitian berada pada formasi Nglanggran,

formasi Semilir, formasi Wonosari, Alluvium, dan formasi Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda. Formasi Nglanggran tersusun atas batuan breksi vulkanik dengan fragmen dominan batuan andesit, sedangkan Formasi Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda tersusun oleh material lepas dominan pasir. Satuan geomorfologi pada daerah penelitian, termasuk dalam satuan bentuk lahan dataran dan perbukitan bergelombang (Van Zuidam, 1983) dengan sudut lereng $\pm 15^0$ dan beda tinggi sekitar ± 100 m. Formasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 20.



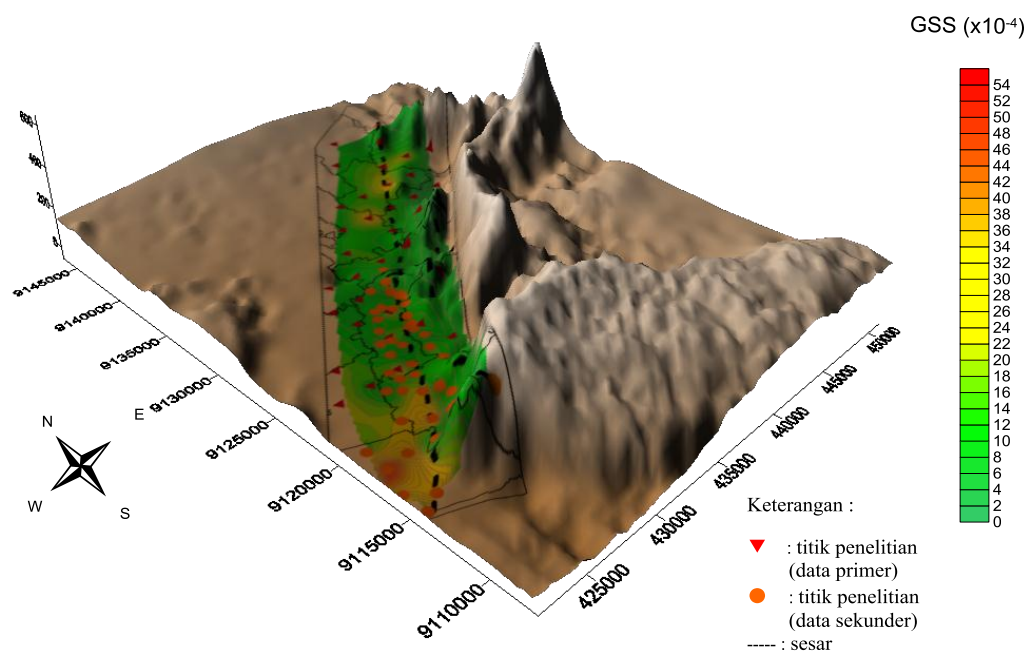
Gambar 20. Mikrozonasi nilai GSS dioverlay dengan Formasi geologi di kawasan Sesar Opak

Pada Gambar 20 dapat dilihat bahwa terdapat kesesuaian antara formasi geologi terhadap nilai GSS dimana untuk kawasan Piyungan jika ditinjau dari

geologi merupakan batuan andesit dan breksi vulkanik, sedangkan pada daerah Sanden merupakan tanah lempung dan pasir yang tergolong lebih lunak. Tanah yang lunak memiliki amplitudo gelombang yang lebih tinggi dibandingkan tanah yang keras, sehingga tanah yang lebih lunak akan menjadi lebih mudah mengalami kerusakan dibandingkan tanah yang lebih keras. Titik data dengan nilai GSS tertinggi berada di formasi Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda (Qmi), tersusun atas material lepas dengan material yang berbutir lempung hingga kerakal. Namun pada lokasi penelitian, hanya dijumpai material – material lepasan dengan ukuran butir mayoritas pasir yang sebagian besar lahannya difungsikan sebagai lahan bangunan rumah warga dan sawah. Pada umumnya likuifaksi terjadi pada lapisan yang terbentuk oleh material-material lepas dengan ukuran butir berupa pasir hingga lanau. Hal ini disebabkan oleh kemampuan lapisan dengan ukuran butir pasir yang cenderung dapat menyimpan air. Kondisi lapisan yang jenuh dengan air dapat menjadi salah satu faktor yang menyebabkan suatu daerah menjadi berpotensi untuk terjadi peristiwa likuifaksi.

Dari nilai GSS yang diperoleh dapat dibuat *3D-Surface* dengan peta topografi Sesar Opak, yang ditunjukkan oleh Gambar 21. Berdasarkan Gambar 21 nampak bahwa topografi jalur Sesar Opak sebagian besar berada di dataran rendah. Fenomena yang muncul berdasarkan nilai GSS dari penelitian ini dapat memberikan informasi daerah yang lebih direkomendasikan untuk dilakukan pembangunan, yaitu kawasan yang memiliki nilai GSS yang lebih kecil seperti kawasan sekitar Piyungan, Pleret, Sewon. Daerah yang kurang direkomendasikan untuk dilakukan pembangunan yaitu yang memiliki nilai GSS yang lebih tinggi

seperti Sanden, Pundong, Banguntapan, Brebah, dan Prambanan. Fenomena yang ada saat terjadi gempa bumi di seluruh jalur Sesar Opak menunjukkan potensi yang sama, hanya saja jika kekuatan lebih tinggi kerusakan yang diakibatkan akan semakin besar.



Gambar 21. 3D-Surface nilai GSS (*Ground Shear Strain*) untuk magnitudo 5,9SR

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian dan analisis data maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Besarnya nilai GSS (*Ground Share Strain*) di sepanjang jalur Sesar Opak berkisar antara $3,9 \times 10^{-5} - 5,3 \times 10^{-3}$. Nilai GSS tertinggi berada pada kawasan Sanden yaitu $5,3 \times 10^{-3}$ dan terendah pada kawasan Piyungan yaitu $3,9 \times 10^{-5}$.
2. Fenomena yang mungkin terjadi di sepanjang jalur Sesar Opak berdasarkan nilai GSS untuk $10^{-5} - 10^{-3}$ adalah getaran, keretakan tanah dan penurunan tanah.

B. SARAN

Untuk penelitian berikutnya sebaiknya memperluas batasan penelitian agar mencakup seluruh wilayah, tidak hanya di sepanjang jalur Sesar Opak. Selain itu, perlu penelitian tentang metode lain pada PGA untuk menentukan GSS (*Ground Share Strain*).

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z. H., Andreas H., Meliano, I, Gamal M., Kusuma MA., Kimata F, dan Ando, M. (2007). Deformasi Seismik Gempa Yogyakarta Dari Survei GPS. *Jurnal Geofisika*. Indonesia: Edisi. 2007, No. 1.
- Abu, Bakri. (2014). *Analisis Ground Shear Strain dengan Metode HVSR Di Kabupaten Kulonprogo Daerah Istimewa Yogyakarta*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Alwyn, Taufana. (2013). *Pemetaan Kerentanan Daerah Potensi Likuifaksi, Akibat Gempabumi Tektonik Studi Kasus DIY*. Semarang: UNDIP.
- Arifin, A.S., Mulyatno, B. S., Marjiyono & Setianegara, R., (2013). *Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Nilai Amplifikasi HVSR Mikrotremor Dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa Dan Sekitarnya*. Lampung: Universitas Negeri Lampung.
- BAKORNAS PBP (Badan Koordinasi Nasional Penanggulangan Bencana dan Penanganan Pengungsi). (2006). *Laporan Perkembangan Penanganan Bencana Gempa Bumi Di Jogjakarta Dan Jawa Tengah*. Jakarta.
- Bemmelen, R. W. Van. (1949). *The Geology of Indonesia v IA*, The Hague. Gov. Printinf Office, Martinus Nihoff, 732p.
- BMKG. (2006). *Data gempa di Indoesia*. Diakses <http://inatews.bmkg.go.id/new/>. pada tanggal 17 April 2016.
- BMKG. (2010). *Kajian Kerawanan Bahaya Gempabumi Di Kabupaten Bantul DIY*. (Laporan Hasil Pekerjaan), Pusat Penelitian Dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika.
- Daryono, Sutikno. & Prayitni, Bambang Setio. (2009). *Data Mikrotremor dan Pemanfaatannya untuk Pengkajian Bahaya Gempabumi*. Yogyakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Edwiza, Daz & Sri Novita. (2008). *Pemetaan Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Seismik Kota Padang Panjang Menggunakan Metoda Kannai*. Padang: Repository Universitas Andalas.
- Elnashai, S.A. & Sarno, D.L. (2008). *Fundamental of Earthquake Engineering*. Hongkong: Wiley.

- ESDM. (2006). *Misteri Patahan Sumber Gempa Yogya 2006*. Diakses dari <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/misteri-patahan-sumber-gempa-yogya-2006/.html>. pada tanggal 15 Mei 2016.
- Ettwein.V & Maslin.M. (2011). *Physical Geography: Fundamentals Of The Physical Environment*. London : University of London International Programmes.
- Gadallah, R.M., & Fisher, R. (2009). *Exploration Geophysics*. Berlin: Springer.
- Gunawan, Ibrahim & Subardjo. (2005). *Pengetahuan Seismologi*. Jakarta: Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Gunawan, H. (2010). *Fourier Analysis & Its Application in PDEs*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Hochstein, M. P & Sudarman, S. (2008). *History of Geothermal Exploration in Indonesia from 1970 to 2000*, Geothermics, Vol. 37.
- Husein, S., Subagyo P., Myo T., Tun N., & Jaya M.. (2008). *A Short Note on the Seismic History of Yogyakarta Prior to the May 27, 2006 Earthquake*. The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006. Yogyakarta: Star Publishing Company Inc.
- Kanai, K. (1966). *Improved Empirical Formula for Characteristics of Stray [sic] Earthquake Motion*. Pages 1-4 of: *Proceedings of the Japanese Earthquake Symposium*. Not seen. Reported in Trifunac & Brady (1975).
- Kanai, K. (1983). *Seismology in Engineering*. Japan: Tokyo University.
- Kertapati, E. K. (2006). *Aktivitas Gempabumi di Indonesia: Perspektif Regional pada Karakteristik Gempabumi Merusak, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Pusat Survei Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral*.
- Labertta, Septian. (2014). *Mikrozonasi Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Analisis Mikrotremor Di Kecamatan Jetis Kabupaten Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta. Skripsi*. Yogyakarta: Univeritas Negeri Yogyakarta.
- Lermo, Javier & Chávez-García, Francisco J. (1993). *Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station*. America: Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 83, No. 5. Hlm. 1574-1594.
- Manolakis, Dimitris & Vinay, Ingle. (2011). *Applied Digital Signal Processing Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Mirzaoglu, Mete. & Dýkmen, Ünal. (2003). Application of microtremors to seismic microzoning procedure. *Balkan: Journal of the Balkan Geophysical*, Vol. 6, No. 3. Hlm. 143 – 156.
- Motamed, R. Ghalandarzadeh, A., T awkata, I. & Tabatabei, S.H. (2007). Seismic Microzonation and Damage Assessment of Bam City. Southern Iran : *Journal of Earthquake Engineering*. 11:1, 110-132.
- Nakamura, Y. (1989). *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*. Japan: Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.
- Nakamura, Y. (1997). *Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor*. Florence: World Congress on Railway Research.
- Nakamura, Y. (2000). *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Application*. Japan: Tokyo University.
- Nandi. (2006). *Gempabumi Geologi Lingkungan*. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Newcomb, K.R. & Mc Cann, W.R. (1987). *Seismic History and Seismotectonic of the Sunda Arc*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, no. B1 pp 421-439. American Geophysical Union.
- Nurwidyanto, M. Irham., Indriyana, Rina Dewi., & Darwis, Z. Thata. (2007). *Pemodelan Zona Sesar Opak Di Daerah Pleret Bantul Yogyakarta Dengan Metode Grafitasi*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Nurwidyanto, M. Irham., Brotopspito, K. Sri., Waluyo., & Sismanto. (2011). *Study Pendahuluan Sesar Opak Dengan Metode Gravity (Study Kasus Daerah Sekitar Kecamatan Pleret Bantul)*. Yogyakarta: Universitas Gajahmada.
- Park, Tae H. (2010). *Introduction to Digital Signal Processing, Cumputer Musically Speaking*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Pitilakis, K., C. Gazepis., & A. Anastasiadis. (2004). *Design Response Spectra and Soil Classification for Seismic Code Provisions*. Canada: 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- Proakis, John G., & Manolakis, Dimitris G. (1996). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. New Jersey: Prentice Hall.
- Rosita D, Ella. (2013). *Analisis Ground Shear Strain di Wilayah Kecamatan Jetis Kabupaten Bantul Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor*.

- (Skripsi), Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga.
- Sapiie, B. & Harsolumakso, A. H. (2001). *Geologi Fisik*. Bandung: ITB.
- SESAME European Research Project. (2004). *Guidelines for The Implementation of The H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibration: Measurements, Processing and Interpretation*.
- Slob, Siefko. (2007). *Micro Seismic Hazard Analysis. Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation*.
- Sonjaya, Irman. (2008). *Pengenalan Gempabumi*. Yogyakarta: BMKG.
- Susilawati. (2008). *Penerapan Penjalaran Gelombang Seismik Gempa pada Penelaahan Struktur Bagian dalam Bumi. Sumatra Utara*. Universitas Sumatra Utara.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R.E. (2004). *Aplied Geophysics, Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Tokimatsu, K. (2004). *S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor H/V spectrum*. Bulletin of the Seismological Society of America No.94(1).
- Thomson. (2006). *Geology of the Oceans*. Utah: Brooks/Cole Publishing Company.
- Van Loan, Charles. (1992). *Computational Frameworks for the Fast Fourier Transform*. Philadelphia: SIAM Publications.
- Van Zuidam, R. A. (1983). *Aspects of The Applied Geomorphologic Map of Republic of Indonesia*. The Netherlands: ITC.
- Wahyudi. (2008). *Aplikasi Mikroseismik untuk Memindai dan Mengidentifikasi Keberadaan Hidrokarbon*. Yogyakarta: Berkala Ilmiah MIPA Volume 18 (2).
- Walter, T.R., B.G. Luehr, R. Wang, M. Sobiesiak, H. Grosser, H.U. Wetzel, C. Milkereit, J. Zschau, J. Wassermann, P.J. Prih Harjadi and Kirbani S. B. (2008). The 26 May 2006 6.4 Yogyakarta Earthquake South of Mt. Merapi Volcano: *Did Lahar Deposits Amplify Ground Shaking and thus Lead to Disaster, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, An Electronic Journal of the Earth System*.
- USGS. (2006). <http://earthquake.usgs.gov/hazards/apps/vs30/custom.php>. pada tanggal 20 Maret 2016.

Lampiran 1. Data Hasil Penelitian

ID	Lintang(°)	Bujur (°)	f	A	Vs 30	Kg(s ² /cm)	PGA(cm/s ²)
B1	-7.890405	110.38569	1.44	4.393	335.174	7.42061E-08	108.638
B2	-7.897225	110.3878067	3.24	4.998	379.952	5.26665E-08	164.247
B3	-7.894521667	110.387315	9.48	4.43	379.952	1.2655E-08	281.233
B4	-7.89691	110.373665	3.6	4.781	263.59	4.46764E-08	178.995
B5	-7.917696667	110.3728117	1.28	3.745	257.739	8.65172E-08	117.135
B6	-7.926276667	110.3605367	2.84	2.283	233.256	4.87596E-08	185.388
B7	-7.918755	110.3530617	3	1.794	260.819	2.30987E-08	188.325
B8	-7.939806667	110.35399	1.76	2.656	243.148	6.14856E-08	157.142
B9	-7.903001667	110.3649233	3.16	4.218	263.018	4.81367E-08	176.995
C1	-7.903081667	110.3839033	3.12	4.415	384.242	2.90407E-08	165.895
C9	-7.915885	110.3751967	4.16	5.125	305.061	7.4997E-08	209.198
C10	-7.916573333	110.3761317	2.64	5.411	305.061	4.40515E-08	165.829
D2	-7.961963333	110.3509817	2.04	4.5	440.699	4.3521E-08	182.287
D3	-8.006236667	110.3394033	3.4	3.431	474.643	2.0397E-08	254.117
D5	-8.013983333	110.29315	1.12	2.884	292.121	9.78033E-08	148.168
D6	-7.982503333	110.3112267	1.2	5.011	240.345	1.83373E-07	154.37
D7	-7.994165	110.2857517	1.64	7.273	240.345	1.65174E-08	178.338
D8	-7.970336667	110.2984233	1.72	3.084	255.796	7.30134E-08	180.012
D9	-7.984476667	110.2975817	0.64	7.349	247.383	3.06599E-07	112.362
t1	-7.946513333	110.3318733	3.8	1.598	250.338	4.77276E-08	247.081

t4	-7.94447	110.342185	1.32	2.691	243.148	7.78965E-08	139.912
t5	-7.937715	110.3414433	1.84	4.261	248.039	1.67062E-07	207.971
t9	-7.94703	110.3496	3.44	4.003	243.148	4.04281E-08	226.241
t11	-7.92806	110.3509	3.16	3.186	254.124	4.27378E-08	204.314
t13	-7.92050	110.3590	2.68	4.055	233.256	5.04308E-08	176.661
t19	-7.91056	110.3595	3.44	3.982	250.338	4.32098E-08	193.26
t23	-7.94710	110.3683	2.56	4.768	269.763	9.1936E-08	184.63
t24	-7.93646	110.3694	2.96	5.521	255.796	7.09482E-08	194.066
t25	-7.92772	110.3741	4.04	2.415	258.501	3.84256E-08	214.122
t26	-7.92033	110.3734	2.8	3.921	255.796	7.02195E-08	177.153
t28	-7.89748	110.3682	3.76	3.297	263.59	4.54154E-08	186.983
t34	-7.91089	110.3779	5.24	7.72	305.061	4.47743E-08	228.121
t35	-7.90147	110.3773	2.04	5.501	302.582	7.3769E-08	136.751
t37	-7.88339	110.3781	3.32	3.234	271.406	3.34153E-08	160.232
t43	-7.88383	110.3884	2	3.6	335.174	7.73123E-08	121.951
t48	-7.87477	110.3950	3.4	2.937	250.337	1.06315E-07	150.273
TA1	-7.98689	110.3241	1	1.281	534.308	2.53347E-08	140.583
TA2	-7.99215	110.3265	4.48	2.39	757.868	8.37006E-09	296.65
TA3	-7.98675	110.3248	2.8	1.079	534.308	6.70934E-09	238.347
TA4	-7.97733	110.3437	4	0.9855	650.049	1.20881E-08	268.337
TA5	-7.96798	110.3526	1.96	5.847	440.699	7.65354E-08	172.852
TA6	-7.96637	110.3230	1.2	3.881	238.781	1.19575E-07	146.316
TA7	-7.97456	110.3338	1.2	5.835	248.401	1.54262E-07	149.282
TA8	-7.95797	110.3436	1.12	4.049	247.381	1.75964E-07	136.079
TA9	-7.95102	110.3376	1.08	3.479	250.338	1.00286E-07	132.483

TA10	-7.99984	110.2917	0.6	2.58	240.345	2.37962E-07	112.626
TA11	-8.00954	110.3021	1.16	4.214	194.031	1.29993E-07	152.675
1	-7.939315	110.3461833	1.4	5.876	250.338	1.92407E-07	142.501
2	-7.939708333	110.382645	18.64	8.5	275.769	2.08452E-08	470.122
3	-7.939423333	110.329055	2.64	3.11	247.243	5.53093E-08	201.475
4	-7.939628333	110.31033	1.2	3.848	226.331	9.66469E-08	137.499
5	-7.918868333	110.3599417	0.92	3.949	233.256	3.85461E-07	103.35
6	-7.921156667	110.3787433	2.84	7.187	317.518	6.84851E-08	172.341
7	-7.920773333	110.323725	0.76	3.555	275.878	1.40222E-07	97.9529
8	-7.902771667	110.3738283	1.8	7.065	250.338	8.1107E-08	131.848
9	-7.904406667	110.4091617	13.48	3.069	420.338	9.12966E-09	321.397
10	-7.899868333	110.35526	4.44	4.304	282.706	3.58997E-08	203.69
11	-7.885483333	110.3877883	1.12	8.21	335.174	2.37549E-07	92.0416
12	-7.88525	110.3695167	3.4	4.354	287.082	3.63388E-08	168.934
13	-7.885393333	110.35189	2.92	3.393	267.965	4.43478E-08	158.062
14	-7.866936667	110.4012083	1.4	5.84	271.406	1.34409E-07	91.7632
15	-7.866986667	110.41978	3	5.448	346.353	4.61587E-08	127.14
16	-7.858976667	110.4438467	1.24	1.84	606.341	4.1141E-08	73.5126
17	-7.86725	110.38305	3.08	4.303	278.794	2.34904E-07	60.9429
18	-7.867168333	110.364735	2.48	3.713	278.794	3.84628E-08	133.405
19	-7.849108333	110.4255867	1.76	4.372	270.906	2.15785E-07	70.0449
20	-7.848696667	110.446355	6.64	5.538	468.145	1.6005E-08	162.851
21	-7.849541667	110.3918767	0.8	4.968	297.797	1.84106E-07	66.0332
22	-7.8312	110.4420317	1.44	5.536	263.843	1.99574E-07	72.1929
23	-7.830745	110.459855	17.56	2.659	296.018	5.08677E-09	185.062

24	-7.831045	110.47834	7.64	4.345	614.087	1.80866E-07	148.762
25	-7.831311667	110.42394	1.04	11.35	288.273	5.31911E-07	64.485
26	-7.83101	110.4050067	0.88	4.191	306.389	1.52087E-07	62.0947
27	-7.813065	110.4555783	0.8	9.551	248.039	5.83927E-07	48.5992
28	-7.814015	110.4733683	4.6	3.423	306.238	2.69193E-08	101.128
29	-7.812451667	110.436445	1.04	7.448	306.789	2.28859E-07	48.3631
30	-7.812358333	110.418765	0.76	4.527	309.247	2.61805E-07	50.4476
31	-7.79441	110.4683817	0.56	8.193	303.219	7.17146E-07	36.8876
32	-7.79489	110.4873867	0.68	10.74	294.569	4.69938E-07	39.8424
33	-7.798938333	110.5033133	17.52	2.399	684.056	2.20125E-09	190.408
34	-7.776561667	110.4827767	1.84	4.784	312.702	9.78575E-08	60.1661
35	-7.782696667	110.514725	17.52	3.305	654.693	3.37383E-09	176.884
36	-7.777086667	110.44631	0.8	5.368	323.044	3.33805E-07	43.7627
37	-7.758713333	110.496685	1.56	4.588	350.801	2.03445E-07	51.8805
38	-7.75943	110.53241	1.2	5.188	304.587	1.61301E-07	41.2619
39	-7.758353333	110.460205	0.76	4.925	336.043	2.23924E-07	38.7695

Lampiran 2. Nilai PGA Berdasarkan Data Gempabumi Tahun 2006-20015

ID	Nilai PGA berdasarkan Tahun GEMPABUMI BMKG									
	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006
B1	1.473475	0.75252	3.083732	3.019055	3.15967	1.573337	2.269247	1.692718	1.603482	107.1601
B2	2.225785	1.148674	4.737886	4.566985	4.825899	2.392036	3.504626	2.589	2.421635	164.2474
B3	3.793515	1.948921	8.029257	7.775049	8.196063	4.064476	5.921411	4.389525	4.129768	278.3122
B4	2.46145	1.278522	4.993288	5.150205	5.140491	2.683273	3.810343	2.869659	2.599067	179.9982
B5	1.509791	0.828814	3.147412	3.239398	3.193886	1.717358	2.535051	1.869862	1.586453	117.135
B6	2.317641	1.34265	4.670332	5.196102	4.75042	2.77418	4.04908	3.025836	2.402141	186.7073
B7	2.41396	1.3814	4.675891	5.455512	4.809444	2.883478	4.049087	3.097301	2.468376	189.5928
B8	1.815949	1.140841	3.640634	4.271751	3.679293	2.321466	3.450692	2.579621	1.904619	157.1416
B9	2.387618	1.269566	4.732262	5.111402	4.882727	2.667739	3.748716	2.845679	2.475404	176.9953
C1	2.239412	1.170417	4.748898	4.637133	4.83166	2.435421	3.577128	2.63867	2.407869	166.9686
C9	2.699823	1.469265	5.662398	5.750943	5.743696	3.045308	4.502709	3.315361	2.848245	208.1997
C10	2.144922	1.168662	4.518668	4.565474	4.577663	2.41977	3.591194	2.638364	2.267704	165.829
D2	1.84688	1.328603	3.777092	4.61879	3.758583	2.599556	4.120165	3.0377	2.03614	182.2871
D3	1.94875	1.898358	4.027178	5.490754	3.939289	3.317861	5.99084	4.477986	2.470073	254.1173
D5	1.007871	1.262643	1.897416	3.260916	1.89389	2.041847	3.238021	2.975122	1.348898	148.1682
D6	1.266644	1.249826	2.3668	3.813636	2.380137	2.267106	3.392303	2.866622	1.509299	154.37
D7	1.311024	1.556717	2.373723	4.304233	2.397041	2.640116	3.778026	3.583359	1.67647	178.3384
D8	1.541623	1.507205	2.749824	4.780452	2.800675	2.797939	3.810944	3.404968	1.806532	180.0121
D9	0.886196	0.947462	1.613664	2.798319	1.630629	1.681643	2.412227	2.167495	1.082069	112.3617
1	2.647266	1.87925	4.953536	6.867856	5.051193	3.783843	5.346569	4.22954	2.802873	247.0808

4	1.572247	1.055815	3.038162	3.897457	3.08374	2.135514	3.103589	2.382812	1.65437	142.081
5	1.88098	1.220164	3.588006	4.603311	3.66327	2.495305	3.546273	2.744052	1.953831	163.9702
9	2.512486	1.665135	5.00772	6.098298	5.046765	3.35177	5.027349	3.772815	2.665256	227.5677
11	2.478429	1.483717	4.826537	5.741273	4.935579	3.068963	4.377568	3.334899	2.549143	203.0335
13	2.261057	1.28427	4.49079	5.037713	4.594241	2.670696	3.827956	2.886984	2.328281	177.9945
19	2.54559	1.395238	4.995159	5.574577	5.146541	2.924809	4.110277	3.127736	2.615167	193.2597
23	2.09774	1.316555	4.484352	4.810318	4.45531	2.64039	4.173135	3.001004	2.271217	186.0894
24	2.294761	1.364665	4.854781	5.130142	4.862583	2.77676	4.263093	3.096646	2.441244	192.7676
25	2.667736	1.51625	5.672296	5.803112	5.702486	3.110345	4.718442	3.433778	2.830858	215.1898
26	2.229828	1.234126	4.677901	4.797467	4.734457	2.55058	3.793746	2.787164	2.349102	174.6756
28	2.556571	1.336827	5.090875	5.40604	5.259163	2.812499	3.946865	2.995904	2.672941	186.9826
34	2.992531	1.600372	6.291025	6.302493	6.392769	3.324682	4.894501	3.608986	3.171974	227.2549
35	1.848157	0.966135	3.822095	3.858264	3.912615	2.019336	2.914481	2.173071	1.960128	136.7514
37	2.251523	1.143021	4.554242	4.645403	4.709577	2.404644	3.378566	2.562437	2.430594	161.2061
43	1.689531	0.855774	3.532035	3.444087	3.625624	1.79032	2.570517	1.924094	1.862182	121.951
48	2.088666	1.0511	4.395385	4.229596	4.511745	2.195532	3.153046	2.36399	2.363503	150.2734
TA1	1.156991	1.096359	2.247166	3.346173	2.238901	1.9885	3.175989	2.534678	1.381934	140.5834
TA2	2.392589	2.308078	4.708377	6.91041	4.671254	4.133827	6.799911	5.364886	2.903523	297.983
TA3	1.939017	1.82882	3.772942	5.591734	3.757761	3.320657	5.31485	4.228393	2.313823	235.0131
TA4	2.441265	1.986465	4.964318	6.473589	4.91364	3.746373	6.152217	4.580792	2.812388	268.3372
TA5	1.766991	1.309528	3.661131	4.455141	3.623281	2.530413	4.118534	3.007161	1.984278	180.3706
TA6	1.383528	1.161725	2.599411	3.885003	2.625253	2.228162	3.267247	2.639335	1.551432	148.8173
TA7	1.352132	1.133032	2.655383	3.697932	2.650147	2.140914	3.367388	2.599785	1.544932	149.2816
TA8	1.394023	1.007996	2.762871	3.546295	2.771979	1.987015	3.034872	2.293505	1.515659	136.0785
TA9	1.398814	0.99478	2.686851	3.583675	2.721003	1.98729	2.905112	2.249282	1.493764	132.4826

TA10	0.78714	0.936151	1.45083	2.549695	1.457927	1.572359	2.349674	2.171957	1.013526	109.0499
TA11	1.071398	1.26934	2.038389	3.385528	2.030704	2.1018	3.386915	2.983792	1.401565	152.6751
titik 1	1.633398	1.050241	3.177651	3.942287	3.230266	2.141553	3.103948	2.367718	1.703351	142.5008
titik 2	5.493631	3.244426	12.24077	12.021	12.09866	6.540111	10.4469	7.400508	6.029283	467.1243
titik 3	2.233734	1.540508	4.096943	5.766877	4.206581	3.140204	4.304254	3.451156	2.335745	201.4752
titik 4	1.452769	1.098876	2.532317	4.062084	2.619957	2.224356	2.865574	2.444773	1.554235	137.4987
titik 5	1.322061	0.744748	2.629279	2.929528	2.69144	1.550495	2.219964	1.673825	1.361723	103.3504
titik 6	2.20727	1.217711	4.726763	4.707853	4.760661	2.508199	3.784778	2.755269	2.351963	173.5675
titik 7	1.209696	0.774805	2.127952	3.060532	2.218703	1.619834	2.090863	1.720138	1.24212	100.637
titik 8	1.758932	0.924834	3.599857	3.698055	3.691327	1.935167	2.777371	2.07863	1.851664	130.4075
titik 9	4.175557	2.194279	9.547116	8.479107	9.524419	4.496394	6.941177	4.98164	4.793749	320.4471
titik 10	2.865603	1.537979	5.461938	6.260453	5.681686	3.250197	4.432607	3.434235	2.941405	211.4529
titik 11	1.272971	0.64594	2.662686	2.597606	2.731899	1.351129	1.942364	1.452496	1.398656	92.04162
titik 12	2.347316	1.201691	4.625393	4.912868	4.806004	2.537524	3.507801	2.688106	2.490422	167.9485
titik 13	2.246777	1.180772	4.173738	4.888704	4.380604	2.511023	3.331037	2.627415	2.335716	161.4135
titik 14	1.273734	0.640231	2.695104	2.571786	2.764892	1.334492	1.918642	1.440555	1.477638	91.76321
titik 15	1.721448	0.876013	3.797025	3.457524	3.850167	1.807468	2.675421	1.979514	2.086269	127.1399
titik 16	0.964005	0.501826	2.184739	1.94467	2.195039	1.0234	1.547271	1.138227	1.247628	73.51258
titik 17	2.018235	1.012366	4.066842	4.134161	4.220545	2.129967	2.964574	2.267609	2.254156	142.9238
titik 18	1.896639	0.962506	3.618715	3.989322	3.795835	2.041537	2.738665	2.145406	2.060339	133.4054
titik 19	1.209414	0.617774	2.630076	2.441942	2.677928	1.273263	1.862216	1.394611	1.519108	89.41717
titik 20	2.136797	1.114472	4.790102	4.326209	4.827807	2.272907	3.407612	2.525782	2.80896	162.8508
titik 21	0.929002	0.466275	1.881822	1.898385	1.95278	0.977149	1.358909	1.044919	1.089451	66.03324
titik 22	0.955103	0.497766	2.083092	1.947188	2.116093	1.018221	1.494518	1.125285	1.269703	72.19294
titik 23	3.084555	1.637068	6.864974	6.313417	6.923103	3.321255	4.964273	3.711897	4.242594	238.9819

titik 24	1.875835	1.016156	4.243109	3.863309	4.250908	2.044438	3.107327	2.310636	2.667279	149.1529
titik 25	0.873451	0.44838	1.854213	1.780234	1.899652	0.924954	1.328604	1.010265	1.122052	64.48499
titik 26	0.858789	0.43651	1.760112	1.759914	1.820594	0.908138	1.271046	0.979801	1.06724	62.09468
titik 27	0.629886	0.335212	1.368979	1.299753	1.389435	0.681374	1.000258	0.758481	0.87645	48.59925
titik 28	1.409965	0.763004	3.119505	2.920037	3.145591	1.539404	2.298398	1.731218	2.017206	111.2654
titik 29	0.77086	0.403976	1.635913	1.588877	1.673287	0.827759	1.190672	0.91117	1.040533	58.12527
titik 30	0.700562	0.363253	1.448119	1.447496	1.492538	0.749718	1.056285	0.816771	0.919855	51.82993
titik 31	0.468416	0.254746	1.012913	0.97918	1.027433	0.514685	0.755249	0.576867	0.67808	36.88755
titik 32	0.481137	0.266035	1.056495	1.009859	1.065471	0.533663	0.795367	0.604003	0.714549	38.71985
titik 33	2.323794	1.302455	5.170323	4.892569	5.188206	2.597341	3.924994	2.96377	3.514492	190.4076
titik 34	0.756015	0.420463	1.62999	1.600522	1.651324	0.844063	1.240653	0.953137	1.134085	60.83094
titik 35	2.119187	1.207248	4.678998	4.509177	4.69851	2.397757	3.613718	2.747973	3.284863	176.0814
titik 36	0.563871	0.305786	1.176948	1.190181	1.205402	0.621588	0.886307	0.689783	0.809259	43.76275
titik 37	0.624149	0.354524	1.341132	1.33736	1.357375	0.707497	1.041248	0.804425	0.964914	51.22793
titik 38	0.486425	0.283753	1.064444	1.0504	1.069325	0.560148	0.842423	0.646309	0.778351	41.26193
titik 39	0.48792	0.270842	1.019983	1.042298	1.042086	0.546602	0.782953	0.611832	0.726818	38.76947

Lampiran 3. GSS dan Fenomena yang terjadi dari nilainya

Titik	Y (Latitude)	X (Longitude)	GSS	Fenomena
B1	432284.3243	9127768.178	0.000987	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B2	432518.7642	9127014.522	0.000675	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B3	432464.1237	9127313.315	0.000347	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B4	430959.8321	9127047.032	0.000918	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B5	430869.2311	9124748.769	0.001346	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B6	429517.6453	9123798.123	0.000651	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B7	428692.4145	9124628.428	0.00044	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B8	428798.3591	9122301.157	0.000987	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
B9	429997.2329	9126372.095	0.000909	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
C1	432089.4387	9126366.391	0.000623	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
C9	431131.823	9124949.458	0.000851	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
C10	431235.0003	9124873.513	0.001128	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
D2	428470.6163	9119851.039	0.000924	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
D3	427202.3265	9114954.222	0.000547	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
D5	422106.449	9114089.28	0.001322	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
D6	424092.7398	9117573.069	0.002715	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
D7	421287.326	9116278.983	0.003331	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
D8	422679.3692	9118915.831	0.001277	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
D9	422589.2721	9117352.363	0.00528	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t1	426361.8003	9121555.816	0.00042	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t4	427498.004	9121783.542	0.001206	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t5	427415.067	9122530.233	0.00155	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t9	428316.9599	9121502.05	0.001103	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t11	428459.9638	9123599.136	0.000816	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t13	429344.8854	9124436.146	0.001169	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t19	429400.1475	9125535.362	0.000905	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t23	430377.7789	9121496.885	0.001301	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t24	430493.0095	9122673.95	0.001423	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t25	431012.9051	9123641.381	0.000504	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t26	430939.4769	9124457.74	0.000968	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t28	430360.0714	9126983.478	0.00063	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t34	431433.937	9125502.147	0.001111	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t35	431361.6454	9126543.86	0.001234	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t37	431445.3851	9128543.049	0.000586	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t43	432579.0523	9128495.157	0.000663	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
t48	433313.0646	9129498.242	0.000525	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA1	425511.7685	9117090.429	0.000341	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA2	425774.8308	9116509.687	0.000212	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA3	425594.5872	9117106.596	0.000172	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah

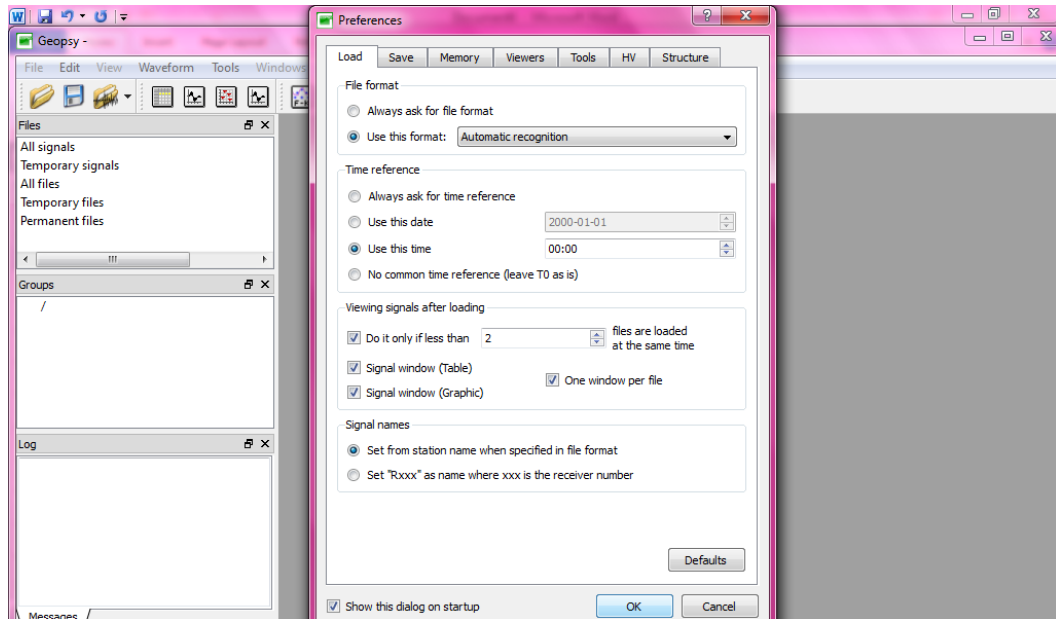
TA4	427669.2859	9118151.409	0.000103	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA5	428648.1805	9119185.94	0.001236	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA6	425382.0455	9119358.523	0.002041	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA7	426575.2985	9118455.352	0.002958	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA8	427661.2923	9120291.075	0.002013	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA9	426994.7126	9121058.581	0.001726	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA10	421949.1078	9115652.698	0.001975	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
TA11	423093.4669	9114582.652	0.002894	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
1	427937.8	9122354.2	0.002419	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
2	431956.7	9122316.8	0.000782	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
3	426049.9	9122339.2	0.000972	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
4	423986	9122313.1	0.001972	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
5	429450.8	9124617.1	0.001925	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
6	431523.6	9124367.2	0.0014	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
7	425459.1	9124400.1	0.001727	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
8	430978.8	9126399	0.00207	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
9	434873.9	9126223.9	0.000176	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
10	428931.5	9126716.9	0.000734	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
11	432514.8	9128312.6	0.002038	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
12	430500.6	9128335.4	0.000758	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
13	428557.5	9128316.6	0.000709	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
14	433991.3	9130365.2	0.001428	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
15	436038.6	9130362.6	0.000675	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
16	438690.5	9131251.8	0.000182	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
17	431989.5	9130327.7	0.000725	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
18	429970.5	9130333.7	0.000725	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
19	436676	9132340	0.00083	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
20	438965.6	9132388.6	0.000294	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
21	432959.7	9132286.9	0.001394	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
22	438486.4	9134322.4	0.001065	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
23	440451.3	9134375.2	0.000124	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
24	442489.3	9134344.6	0.00014	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
25	436491.8	9134307.3	0.002472	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
26	434404.4	9134337.8	0.000977	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
27	439977.3	9136329.2	0.002368	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
28	441938.8	9136226.7	0.000274	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
29	437867.7	9136394.3	0.001374	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
30	435918.4	9136401.9	0.001011	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
31	441386.3	9138393.5	0.001802	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
32	443481.8	9138343	0.002102	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
33	445238.4	9137897.5	3.86E-05	Getaran
34	442971.1	9140368.6	0.000512	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah

35	446494.5	9139694.6	5.14E-05	Getaran
36	438950.2	9140305.5	0.00092	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
37	444502.3	9142343.7	0.000435	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
38	448441.7	9142269	0.000593	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah
39	440479.7	9142378.6	0.000757	Getaran, Keretakan tanah, penurunan tanah

Lampiran 4. Analisis *Sesarray* -*Geopsy*

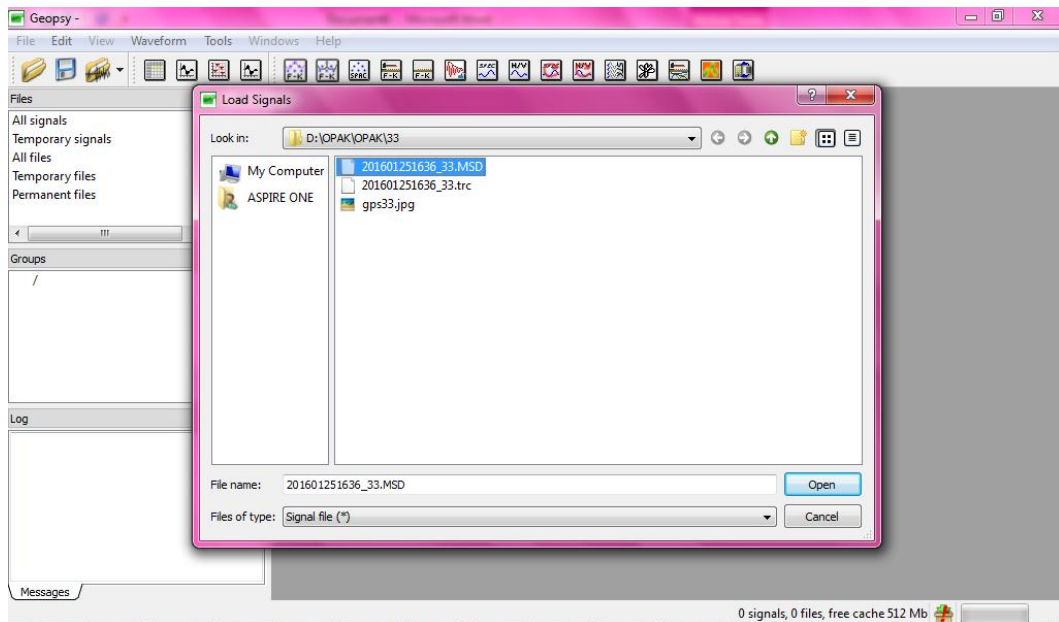
Analisis mikrotremor menggunakan metode HVSR dengan *software Sesarray* -*Geopsy* , adalah sebagai berikut.

1. Membuka aplikasi *software Sesarray* -*Geopsy* , maka akan muncul tampilan seperti gambar L1.



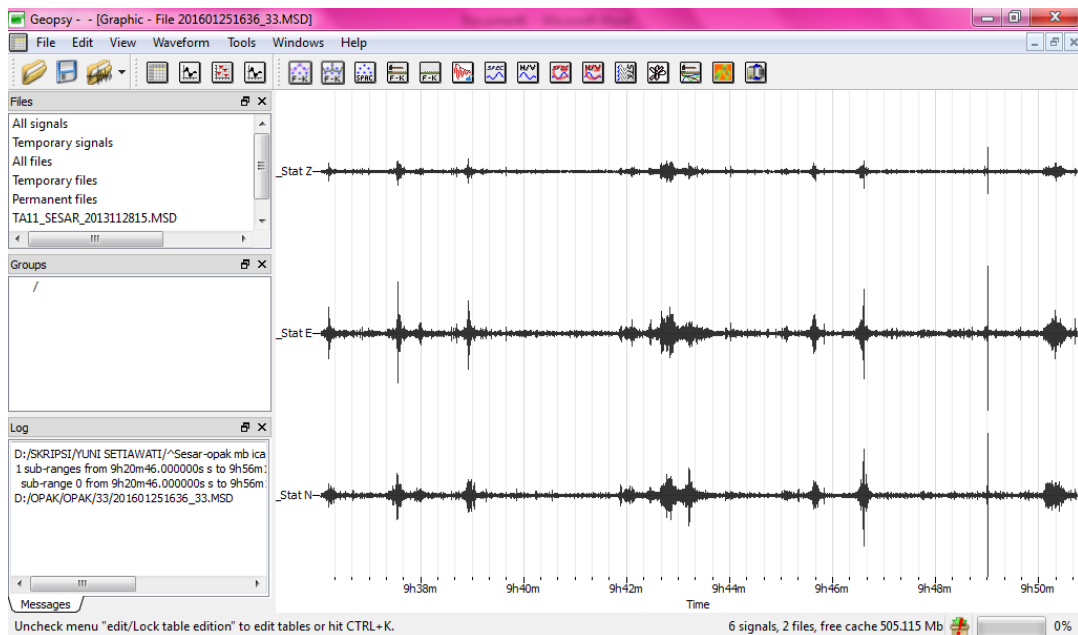
Gambar L1. Tampilan awal *software Sesarray* –*Geopsy*.

2. Pada kotak kecil *Preferences* Klik *OK*.
3. Klik *import signals*, pilih file data format MINI SEED (.msd) kemudian klik *Open*.



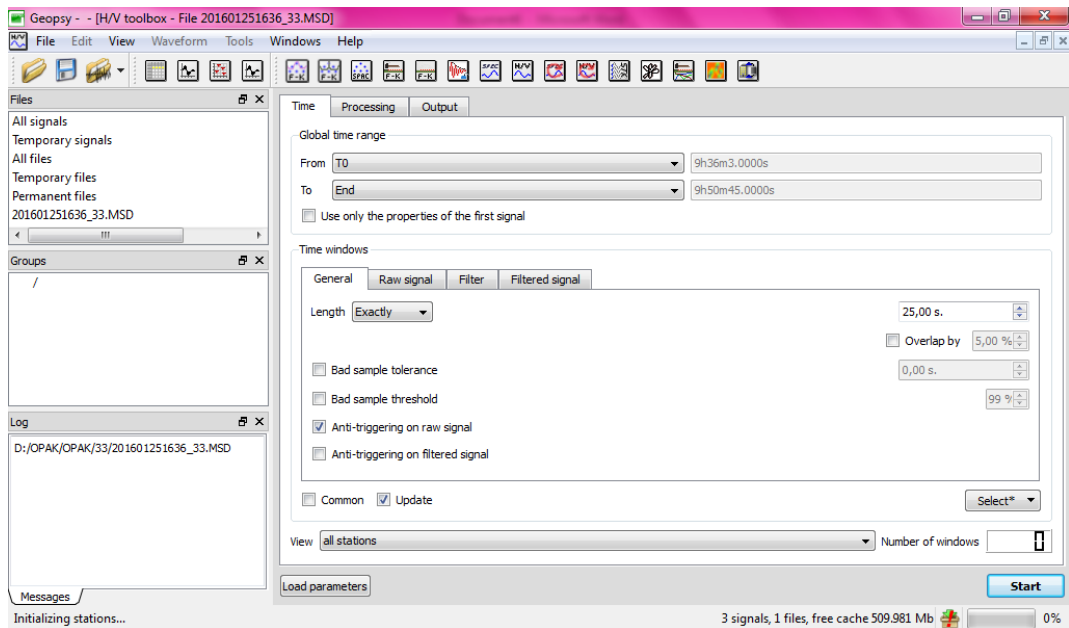
Gambar L2. Tampilan pemilihan data dalam format (.msd).

4. Akan muncul 3 buah sinyal yang terdiri dari 1 komponen vertikal dan 2 komponen *horizontal* (utara-selatan dan barat-timur), seperti di bawah ini:



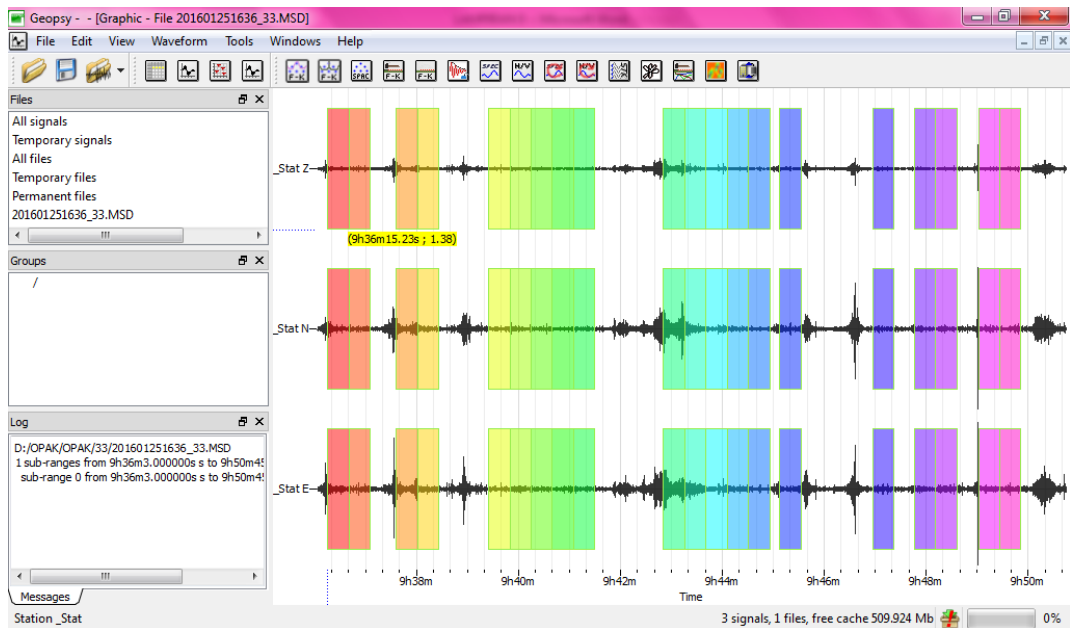
Gambar L3. Tampilan komponen sinyal.

5. Klik *icon H/V* yang tertera pada *toolbox software*, maka akan muncul *H/V toolbox*.



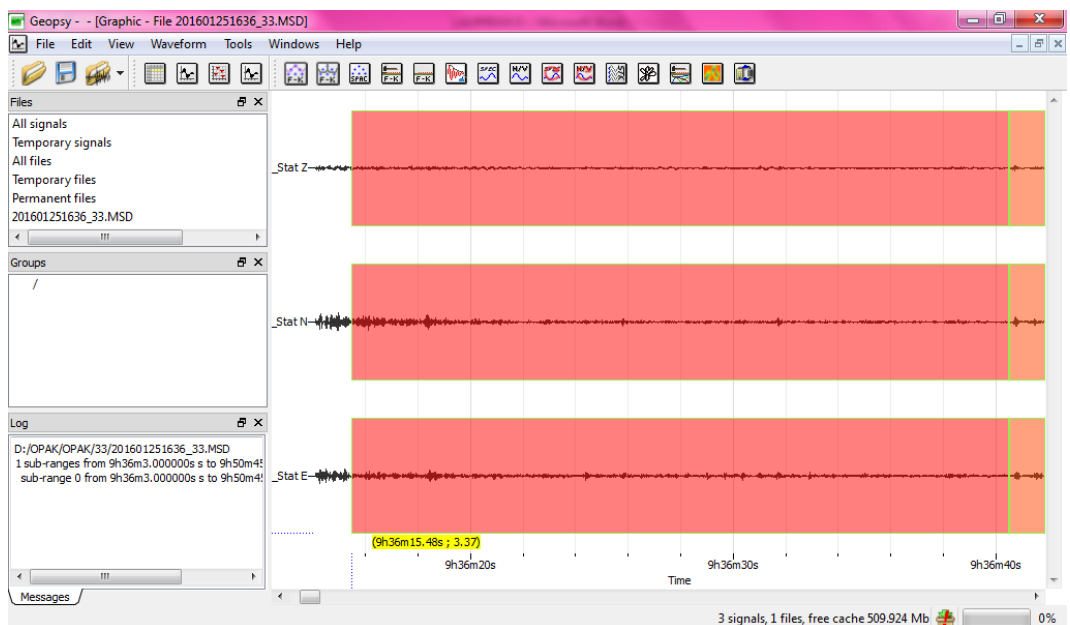
Gambar L4. Tampilan menu kotak *H/V toolbox*.

6. Pada kotak *H/V toolbox* terdapat pilihan *Time*, *Processing*, dan *Output*. Untuk *Time* pilih pengaturan *length windows* 25.00 s dan pilih *add* untuk melakukan pemilihan sinyal tanpa *noise* yang digunakan saat analisis menggunakan *MATLAB R2010a*. Kemudian jumlah sinyal yang dipilih akan tertera pada *Number of windows*. Untuk *Processing* pilih *smoothing type Konno & Ohmachi*. Untuk *Output* atur *Frequency sampling* 0.50 Hz sampai 15.00 Hz dengan *Number of 52 samples* 100. Kemudian klik *start*, maka akan muncul seperti Gambar L5:



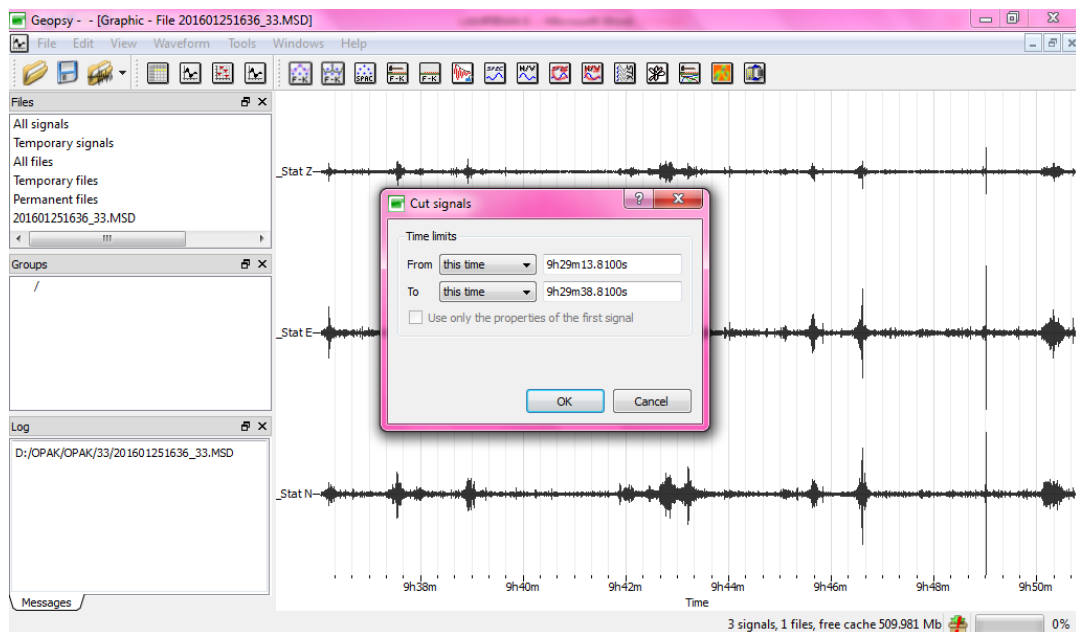
Gambar L5. Tampilan hasil awal proses sinyal.

7. Masing-masing *window* menunjukkan durasi waktu 25 s, untuk mengetahui waktu pertama pada masing-masing *window* yang menunjukkan pada detik *ke-n* dari seluruh waktu perekaman mikrotremor, klik kanan pilih *zoom* lalu perbesar area pojok kiri bawah pada panjang *window* hingga garis waktu berada tegak lurus terhadap pojok kiri panjang *window*, maka akan muncul waktu pertama dari *window* yang dipilih sebagai sinyal tanpa *noise*.



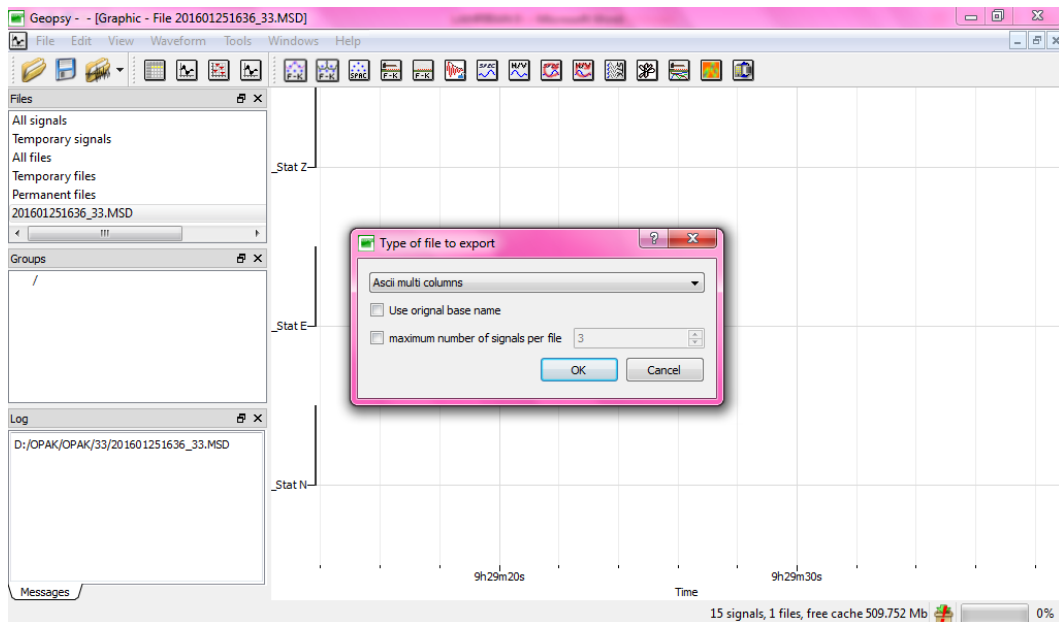
Gambar L6. Tampilan hasil sinyal saat di *zoom*.

8. Mencatat waktu pertama dari masing-masing *window* kemudian menutup aplikasi *software Sassari-Geopsy*.
9. Mengulangi langkah ke-1 sampai langkah ke-4 kemudian klik *Waveform* pilih cut. Pada kotak kecil *Cut signals* pilih *this time* pada *Time limits From* ketik waktu pertama *window* tersebut kemudian jumlahkan waktu pertama dengan 25 detik. Hasil penjumlahan tersebut diketik pada *Time limits To* sebagai waktu akhir *window* tersebut, kemudian klik OK.



Gambar L7. Tampilan proses *Cut signals*.

10. Untuk menyimpan hasil cut gelombang setiap *window* ke dalam format text (.txt), klik file pilih export. Pada kotak kecil *Type of file to export* pilih format *Ascii multi columns* lalu klik OK.



Gambar L8. Tampilan proses *Type of file to export*.

11. Pada kotak kecil *Export Ascii multi columns* pilih lokasi penyimpanan lalu ketik nama file “1” yang menunjukkan *window* ke-1, klik *save*.
12. Proses ini dilakukan untuk semua hasil pengukuran yang dilakukan di setiap titik lokasi penelitian.

Lampiran 5. Program Analisis Matlab

A. Program

```
clc; clear all;clf;
%=====Komponen E=====
x=xlsread('E.xlsx');
P=2048;          %panjang window

PW=[0 1 2 3 9 10 15 16 17 18 19 20 21 22 23 34 35 36 37 38 39 40];
%Matriks potongan data window
jumlah_window=length(PW);

for i=1:length(PW);
    s=0;
    W=x((PW(i)*P)+1:(PW(i)+1)*P);
    [hasil_fft]=fft_64(W);
    s = s + hasil_fft;
end

S=s/jumlah_window;

fs=100;
N=length(W);
k=0:1:(N-1);
fx=(fs/N)*k';

f=fx';
St=S';

%===== Smoothingnya=====
b=40;
[S1]=smooth_spektrum(St,f,b);

S1t=S1';

%=====Plotnya=====
plot(f(1:400),S1(1:400),'r');
```

B. Program *Fast Fourier Transform* (FFT)

```
function [hasil]=fft_64(W)
    %W adalah sinyal input
    N=length(W);      %Jumlah data sinyal
    r=64;      %radix 64
    k=0:(N/r)-1;
    n=0:N-1;

    %=====FFT RADIX 64=====

    z1=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r)/N)*W(r*k+1)';
    z2=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+1)/N)*W(r*k+2)';
```

```

z3=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+2)/N)*W(r*k+3)';
z4=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+3)/N)*W(r*k+4)';
z5=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+4)/N)*W(r*k+5)';
z6=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+5)/N)*W(r*k+6)';
z7=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+6)/N)*W(r*k+7)';
z8=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+7)/N)*W(r*k+8)';
z9=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+8)/N)*W(r*k+9)';
z10=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+9)/N)*W(r*k+10)';
z11=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+10)/N)*W(r*k+11)';
z12=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+11)/N)*W(r*k+12)';
z13=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+12)/N)*W(r*k+13)';
z14=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+13)/N)*W(r*k+14)';
z15=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+14)/N)*W(r*k+15)';
z16=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+15)/N)*W(r*k+16)';
z17=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+16)/N)*W(r*k+17)';
z18=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+17)/N)*W(r*k+18)';
z19=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+18)/N)*W(r*k+19)';
z20=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+19)/N)*W(r*k+20)';
z21=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+20)/N)*W(r*k+21)';
z22=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+21)/N)*W(r*k+22)';
z23=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+22)/N)*W(r*k+23)';
z24=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+23)/N)*W(r*k+24)';
z25=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+24)/N)*W(r*k+25)';
z26=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+25)/N)*W(r*k+26)';
z27=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+26)/N)*W(r*k+27)';
z28=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+27)/N)*W(r*k+28)';
z29=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+28)/N)*W(r*k+29)';
z30=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+29)/N)*W(r*k+30)';
z31=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+30)/N)*W(r*k+31)';
z32=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+31)/N)*W(r*k+32)';
z33=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+32)/N)*W(r*k+33)';
z34=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+33)/N)*W(r*k+34)';
z35=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+34)/N)*W(r*k+35)';
z36=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+35)/N)*W(r*k+36)';
z37=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+36)/N)*W(r*k+37)';
z38=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+37)/N)*W(r*k+38)';
z39=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+38)/N)*W(r*k+39)';
z40=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+39)/N)*W(r*k+40)';
z41=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+40)/N)*W(r*k+41)';
z42=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+41)/N)*W(r*k+42)';
z43=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+42)/N)*W(r*k+43)';
z44=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+43)/N)*W(r*k+44)';
z45=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+44)/N)*W(r*k+45)';
z46=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+45)/N)*W(r*k+46)';
z47=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+46)/N)*W(r*k+47)';
z48=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+47)/N)*W(r*k+48)';
z49=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+48)/N)*W(r*k+49)';
z50=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+49)/N)*W(r*k+50)';
z51=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+50)/N)*W(r*k+51)';
z52=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+51)/N)*W(r*k+52)';
z53=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+52)/N)*W(r*k+53)';
z54=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+53)/N)*W(r*k+54)';
z55=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+54)/N)*W(r*k+55)';
z56=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+55)/N)*W(r*k+56)';
z57=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+56)/N)*W(r*k+57)';
z58=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+57)/N)*W(r*k+58)';
z59=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+58)/N)*W(r*k+59)';
z60=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+59)/N)*W(r*k+60)';
z61=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+60)/N)*W(r*k+61)';

```

```

z62=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+61)/N)*W(r*k+62)';
z63=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+62)/N)*W(r*k+63)';
z64=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+63)/N)*W(r*k+64)';

z=z1+z2+z3+z4+z5+z6+z7+z8+z9+z10+z11+z12+z13+z14+z15+z16+z17+z18+z19
+z20+z21+z22+z23+z24+z25+z26+z27+z28+z29+z30+z31+z32+z33+z34+z35+z36
+z37+z38+z39+z40+z41+z42+z43+z44+z45+z46+z47+z48+z49+z50+z51+z52+z53
+z54+z55+z56+z57+z58+z59+z60+z61+z62+z63+z64;

hasil=abs(2*z/N);

end

```

C. Program *Smoothing Konno-Ohmachi*

```

function [smooth_window]=konno_ohmachi_smoothing_window(f,f_c,b)
    %f == matrix frekuensi
    %fc == center frequency
    %b == konno-ohmachi bandwidth
    l=length(f);
    %apabila f_c=0 buat matriks 0 sepanjang l, kecuali suku
    pertama yg
    %bernilai 1
    if f_c==0
        smooth_window=zeros(1,l);
        smooth_window(1)=1;
        smooth_window=smooth_window/sum(smooth_window);
    else
        smooth_window=(sin(b*log10(f./f_c))./(b*log10(f./f_c))).^4;
        %mengganti inf dengan 1
        posisi_fc= f==f_c;
        smooth_window(posisi_fc)=1;
        %mengganti NaN dengan 0
        posisi_NaN= isnan(smooth_window);
        smooth_window(posisi_NaN)=0;
        smooth_window=smooth_window/sum(smooth_window);
    end
end

```

```

function [smooth_matrix]=hitung_smoothing_matrix(f,b)
    %f adalah matriks frekuensi
    %b adalah bandwidth Konno-Ohmachi
    %smooth_matrix berdimensi length(f) x length(f)
    l=length(f);
    smooth_matrix=[];
    for j=1:l:l
        f_c=f(j);
        [smooth_window]=konno_ohmachi_smoothing_window(f,f_c,b);
        smooth_matrix=[smooth_matrix smooth_window'];
    end
end

```

```

function [spektrum_baru]=smooth_spektrum(S,f,b)

```

```

[smooth_matrix]=hitung_smoothing_matrix(f,b);
spektrum_baru=S*smooth_matrix;
end

```

D. Program *Plotting* Kurva HVSR

```

clc; clear all;clf;

x=xlsread('HVSR.xlsx');
fs=100;
N=length(x);
k=0:1:(N-1);
f=(fs/N)*k';

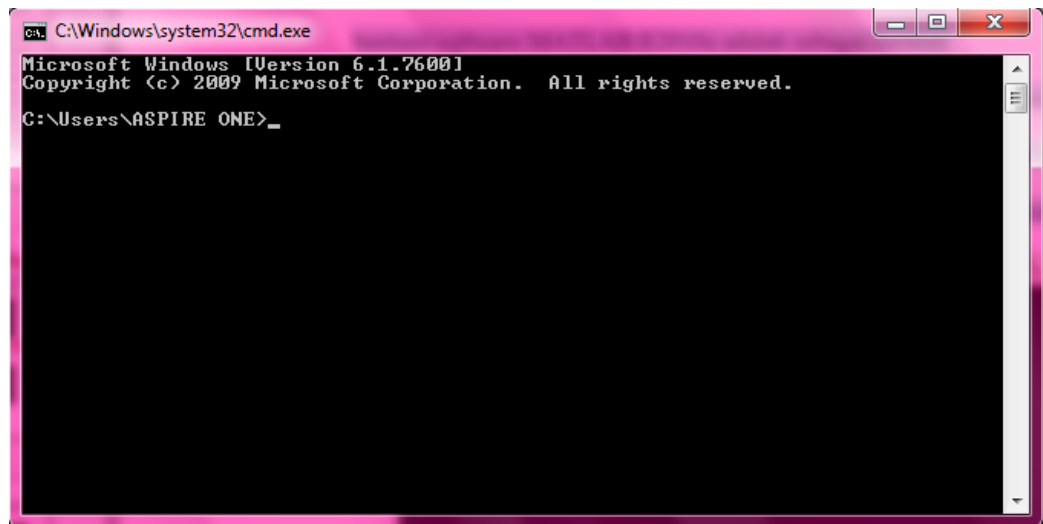
plot(f(1:400),x(1:400));
title('Kurva HVSR');
xlabel('frekuensi'); ylabel('H/V');
xlim([0.5 20]);

```

Lampiran 6. Analisis Mikrotremor dengan Software MATLAB R2010a

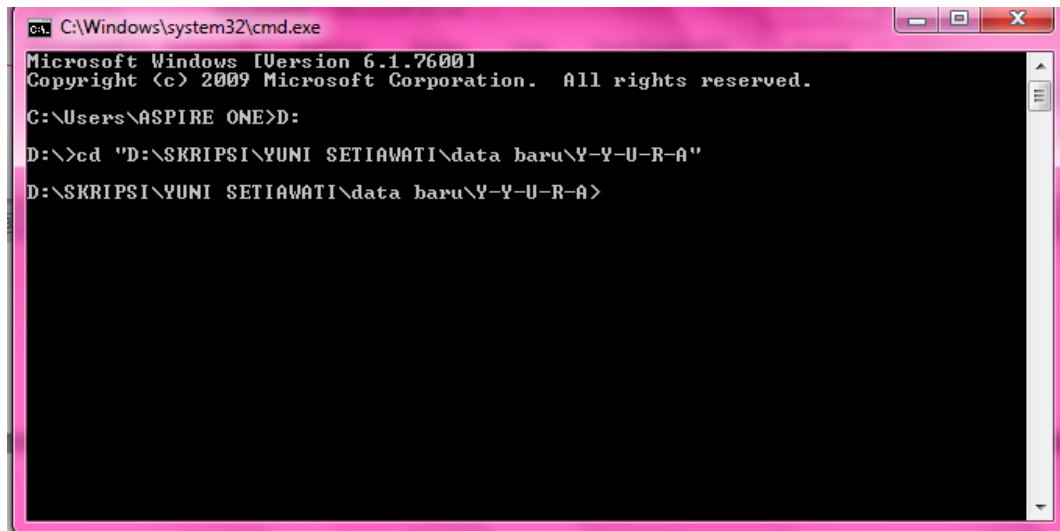
Langkah-langkah analisis mikrotremor menggunakan metode HVSR dengan bantuan software MATLAB R2010a adalah sebagai berikut:

1. Menggabungkan beberapa data mentah hasil *cut* gelombang atau *window* dalam format text (.text) terlebih dahulu dengan menggunakan *Command Prompt*.
2. Menekan Tombol *Window* + R lalu mengetik *cmd*, maka akan muncul:



Gambar L9. Tampilan awal *Command Prompt*.

3. Mengetik *Local Disc* penyimpanan hasil *cut* gelombang dengan diakhiri tanda titik dua (:), lalu *copy address* tempat penyimpanan hasil *cut* gelombang, kemudian ketik *cd* “(paste copy address)” maka akan muncul:

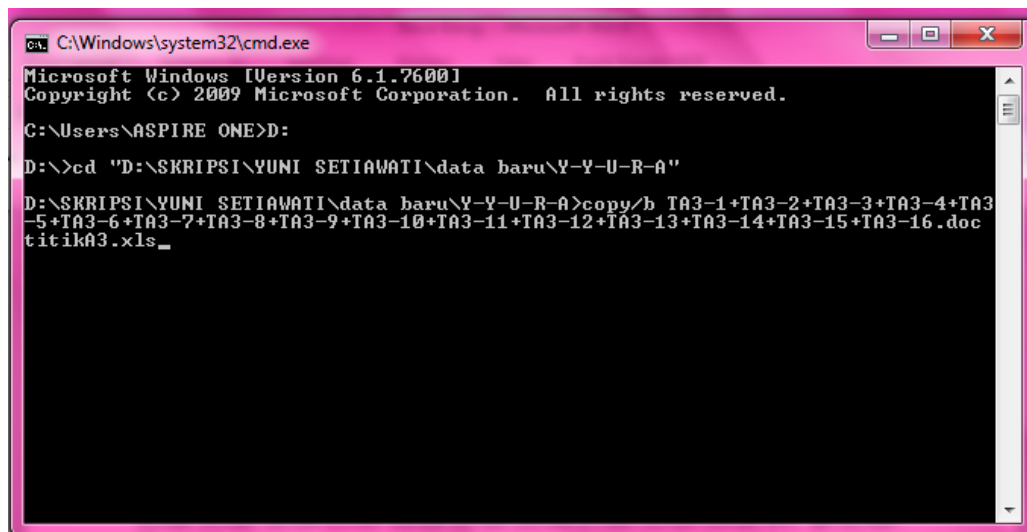


```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7600]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\ASPIRE ONE>D:
D:\>cd "D:\SKRIPSI\YUNI SETIAWATI\data baru\Y-Y-U-R-A"
D:\SKRIPSI\YUNI SETIAWATI\data baru\Y-Y-U-R-A>
```

Gambar L10. Tampilan saat memasukkan alamat file yang disimpan.

4. Selanjutnya ketik *copy/b 1+2+3+...ke-n* (sesuaikan dengan nama dan jumlah file hasil *cut* gelombang) lalu diakhiri dengan nama file yang akan disimpan dalam *format Excel Workbook (.xls)*, maka akan muncul:



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7600]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\ASPIRE ONE>D:
D:\>cd "D:\SKRIPSI\YUNI SETIAWATI\data baru\Y-Y-U-R-A"
D:\SKRIPSI\YUNI SETIAWATI\data baru\Y-Y-U-R-A>copy/b TA3-1+TA3-2+TA3-3+TA3-4+TA3-5+TA3-6+TA3-7+TA3-8+TA3-9+TA3-10+TA3-11+TA3-12+TA3-13+TA3-14+TA3-15+TA3-16.doc titik03.xls_
```

Gambar L11. Tampilan saat memasukkan gabungan hasil *cutting*.

5. Membuka file yang telah diubah ke dalam *format Excel Workbook (.xls)* dengan menggunakan *Software Microsoft Excel*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	645	-2540	-1901												
2	-2038	1484	-1646												
3	-1584	3029	161												
4	1340	-491	2687												
5	1823	-3446	2785												
6	1278	-1213	3027												
7	1380	1272	389												
8	-542	505	-4037												
9	-2608	1167	-4583												
10	-2321	1968	-4220												
11	-1028	2595	-1573												
12	-984	2908	1661												
13	-761	629	3562												
14	1935	-1382	4707												
15	3600	-2837	2696												
16	2420	-2198	-609												
17	-41	-773	-2938												
18	-2233	305	-1308												
19	-3187	812	1422												

Gambar L12. Tampilan data gabungan hasil *cutting* pada *Software Microsoft Excel*.

6. Kolom A menunjukkan file data SHZ, kolom B menunjukkan file data SHN, dan kolom C menunjukkan file data SHE, kemudian membuat data mikrotremor yang tadinya hanya pada satu file saja menjadi tiga file sehingga 2 komponen horizontal terpisah dengan komponen vertikal. Simpan file dengan format EW.xlsx untuk komponen *East-West*, NS.xlsx untuk komponen *North-South*, dan V.xlsx untuk komponen vertikal.
7. Membuka *software MATLAB R2010a* untuk melakukan proses *run* program.

Lampiran 7. Kriteria *Reliable Curve* dan *Clear Peak* SESAME European Research Project

Titik Data	Nw	Kriteria <i>Reliable</i>			Kriteria <i>Clear Peak</i>					
		i	ii	iii	i	ii	iii	iv	v	vi
b1	54	v	v	v	-	v	v	-	-	v
b2	52	v	v	v	-	v	v	v	-	v
b3	33	v	v	v	-	-	v	v	-	v
b4	55	v	v	v	-	v	v	v	-	v
b5	56	v	v	v	-	v	v	v	-	v
b6	61	v	v	v	-	v	v	v	-	v
b7	62	v	v	v	-	-	-	v	-	v
b8	58	v	v	v	-	v	v	v	-	v
b9	38	v	v	v	-	v	v	v	-	v
c1	35	v	v	v	-	-	v	v	-	v
c9	42	v	v	v	-	v	v	v	-	v
c10	29	v	v	v	-	v	v	v	-	v
d2	38	-	v	-	-	v	v	v	-	v
d3	31	-	v	-	-	-	v	v	-	v
d5	59	-	v	-	v	v	v	v	-	v
d6	50	-	v	-	v	v	v	v	-	v
d7	40	-	v	-	v	v	v	v	-	v
d8	26	-	v	-	-	v	v	v	-	v
d9	62	-	v	-	v	v	v	v	-	v
ta1	17	v	v	v	-	-	-	v	-	v
ta2	76	v	v	v	-	v	v	v	-	v
ta3	16	v	v	v	-	v	-	v	-	v
ta4	74	v	v	v	-	-	v	v	-	v
ta5	61	v	v	v	-	v	v	v	-	-
ta6	63	v	v	v	-	v	v	v	-	v
ta7	74	v	v	v	-	v	v	v	-	v
ta8	61	v	v	v	-	v	v	v	-	v
ta9	43	v	v	v	-	-	v	v	-	v
ta10	73	v	v	v	-	v	v	v	-	v
ta11	77	v	v	v	-	v	v	v	-	v
t1	52	v	v	v	-	v	-	v	-	-
t4	11	v	v	v	-	v	v	v	-	v
t5	22	v	v	v	-	-	v	v	-	v
t9	31	v	v	v	v	v	v	v	-	v

t11	19	v	v	v	-	v	v	v	-	v
t13	28	v	v	v	v	-	v	v	-	v
t19	28	v	v	v	-	v	v	v	-	v
t23	26	v	v	v	-	v	v	v	-	v
t24	42	v	v	v	-	v	v	v	-	v
t25	33	v	v	v	-	v	v	v	-	-
t26	37	v	v	v	-	-	v	v	-	v
t28	40	v	v	v	-	v	v	v	-	-
t34	50	v	v	-	-	v	v	v	-	-
t35	47	v	v	v	v	v	v	v	-	v
t37	23	v	v	v	-	-	v	v	-	v
t43	29	v	v	v	-	v	v	v	-	v
t48	40	v	v	v	-	v	v	v	-	v
1	36	v	v	v	-	v	v	v	-	v
2	33	v	v	-	-	v	v	v	-	v
3	35	v	v	v	-	v	v	v	-	v
4	51	v	v	v	-	-	v	v	-	v
5	20	v	v	v	-	v	v	v	-	v
6	72	v	v	v	-	v	v	v	-	v
7	50	v	v	v	-	v	v	v	-	v
8	36	v	v	v	-	v	v	v	-	v
9	57	v	v	v	-	-	v	v	-	v
10	44	v	v	v	-	v	v	v	-	v
11	35	v	v	v	-	v	v	-	-	v
12	42	v	v	v	-	v	v	v	-	v
13	51	v	v	v	-	v	v	v	-	v
14	39	v	v	v	-	v	v	v	-	v
15	26	v	v	v	-	v	v	v	-	v
16	30	v	v	v	-	-	-	v	-	v
17	56	v	v	v	-	-	v	-	-	v
18	41	v	v	v	-	v	v	v	-	v
19	30	v	v	v	v	v	v	v	-	v
20	24	v	v	v	-	v	v	v	-	v
21	34	v	v	v	-	v	v	v	-	v
22	20	v	v	v	v	v	v	v	-	v
23	33	v	v	v	-	-	v	v	-	v
24	26	v	v	v	-	-	v	v	-	v
25	45	v	v	-	-	v	v	-	-	-
26	53	v	v	v	-	v	-	-	-	v
27	51	v	v	v	-	v	v	-	-	v

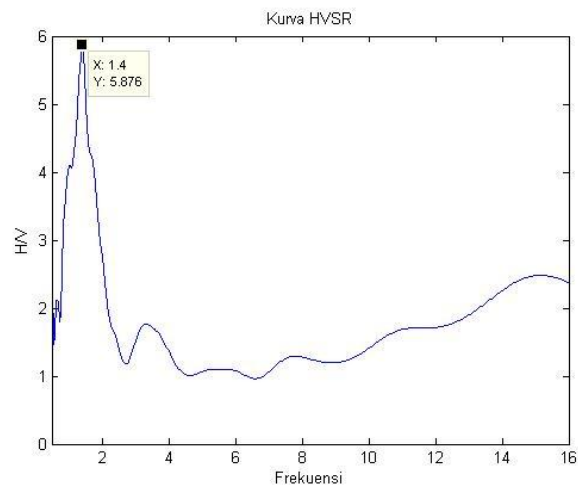
28	20	v	v	v	-	v	v	v	-	v
30	46	v	v	-	-	v	v	-	-	-
31	70	v	v	v	-	-	v	-	-	v
32	62	v	v	v	-	v	v	-	-	v
33	20	v	v	-	-	v	v	-	-	-
34	33	v	v	v	-	-	v	v	-	v
36	32	v	v	v	-	v	v	v	-	v
38	29	v	v	v	-	-	v	v	v	v
40	32	v	v	v	-	v	v	-	-	v
41	45	v	v	v	-	v	v	-	-	v
43	38	v	v	v	-	v	v	-	-	v
45	12	v	v	v	-	v	v	v	-	v

Keterangan Syarat :

No	Kriteria untuk Kurva HVSR yang Reliabel
i)	$f_0 > 10/l_w$
ii)	$n_c > 200$
iii)	$\sigma_A < 2$ untuk $0,5f_0 < f < 2f_0$ jika $f_0 > 0,5 \text{ Hz}$ atau $\sigma_A < 3$ untuk $0,5f_0 < f < 2f_0$ jika $f_0 < 0,5 \text{ Hz}$
No	Kriteria untuk Kurva HVSR yang Clear Peak
i)	$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
ii)	$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
iii)	$A_0 > 2$
iv)	$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
v)	$\sigma_f < \sigma_{f_0}$
vi)	$\sigma_A(f_0) < \sigma(f_0)$

Nilai (v) menandakan syarat terpenuhi, dan nilai (-) menandakan syarat tak terpenuhi.

Lampiran 8. Grafik HVSR Analisis Mikrotremor.

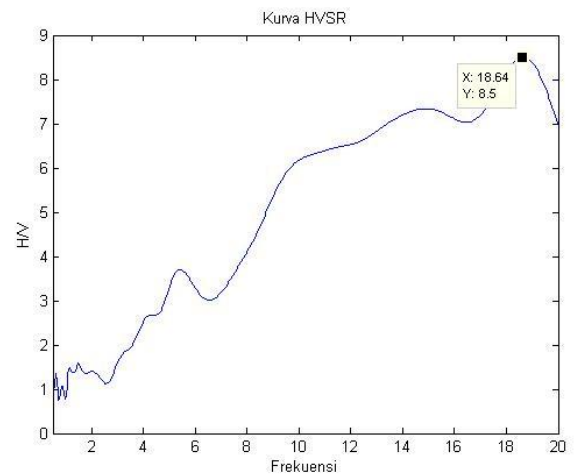


Lokasi Titik: 1

Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

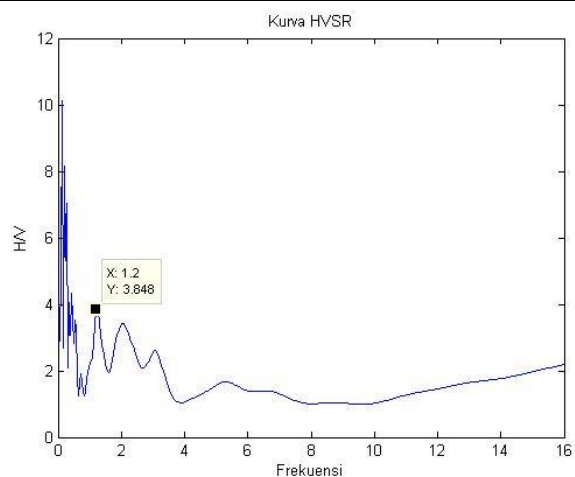


Lokasi Titik: 2

Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

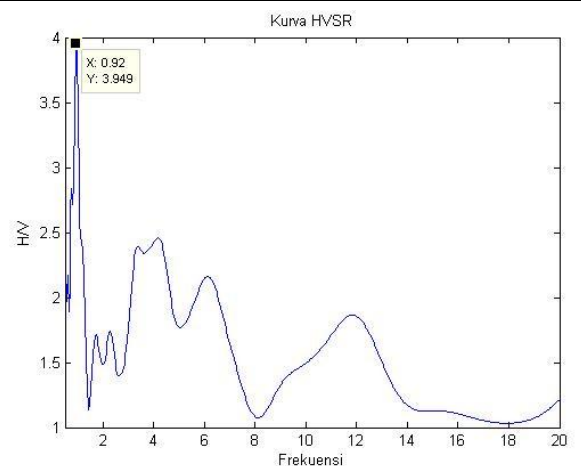


Lokasi Titik: 4

Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

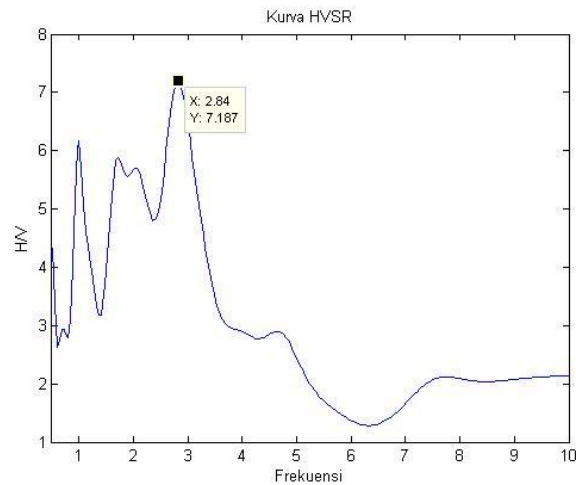


Lokasi Titik: 5

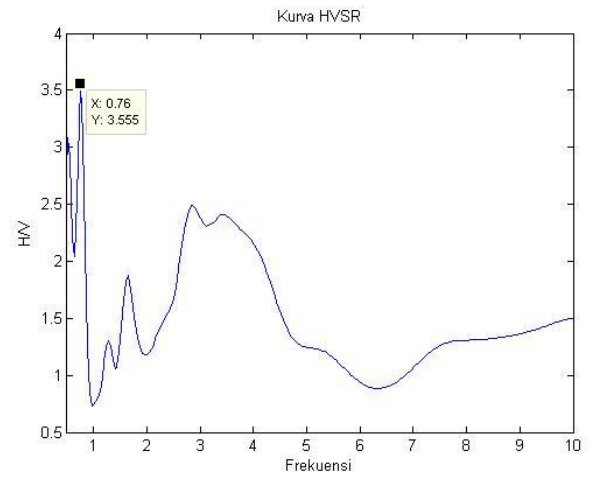
Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

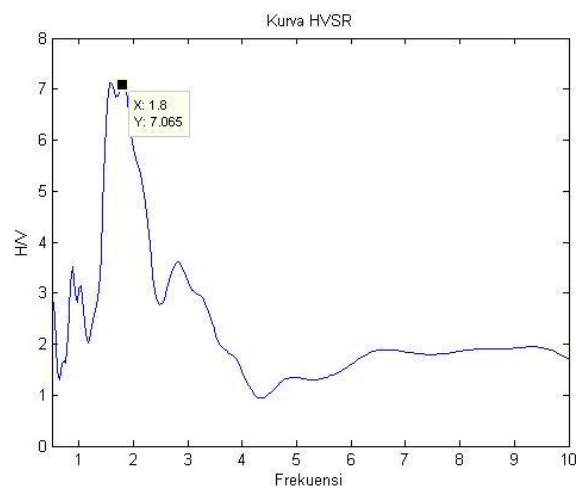
Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



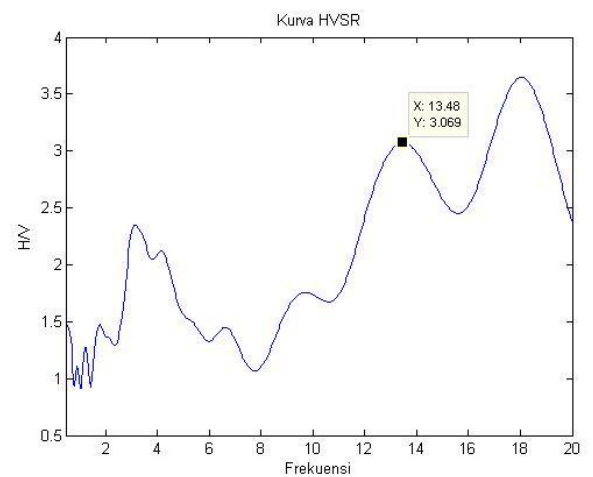
Lokasi Titik: 6
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



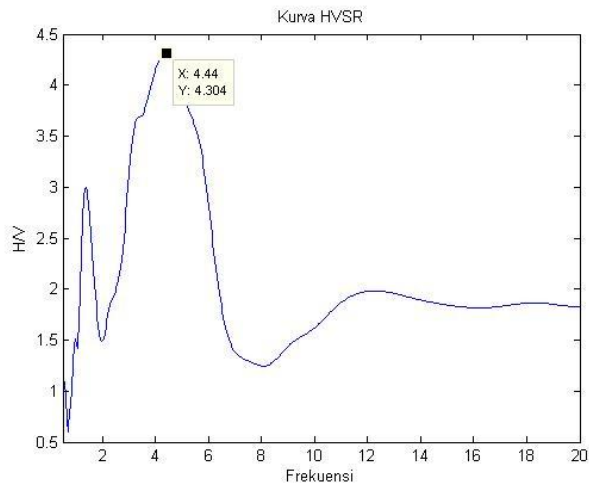
Lokasi Titik: 7
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



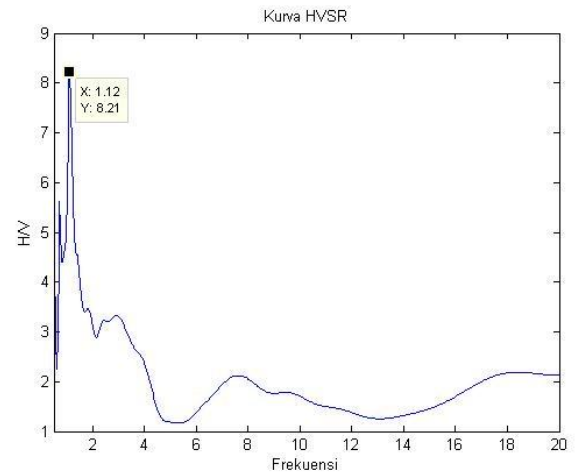
Lokasi Titik: 8
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



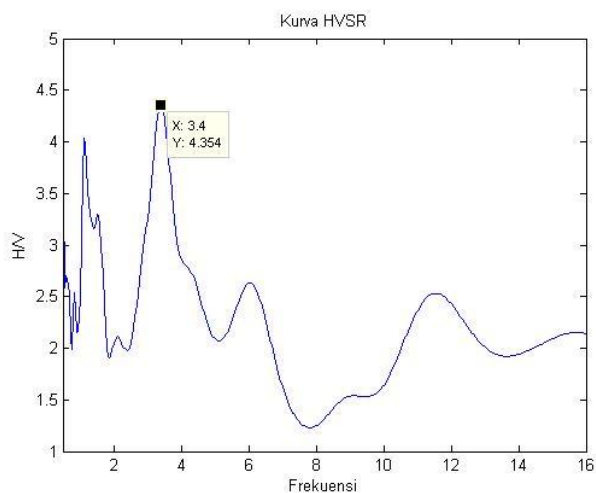
Lokasi Titik: 9
 Formasi Geologi : Semilir
 Informasi Lokasi :
 Perselingan antara breksi tuf, batu apung, tufdasit dan tufandesit serta batuan lempung tufan.



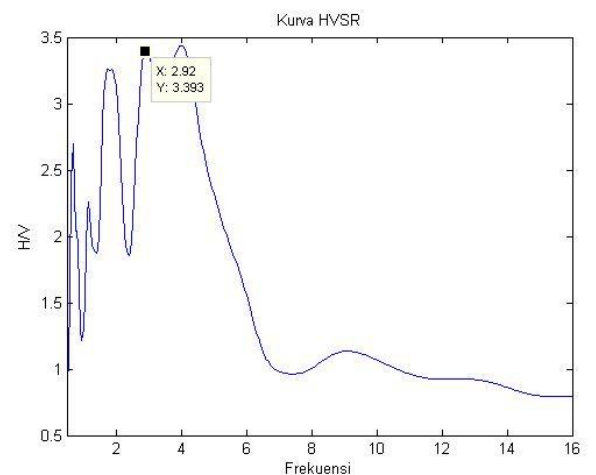
Lokasi Titik: 10
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



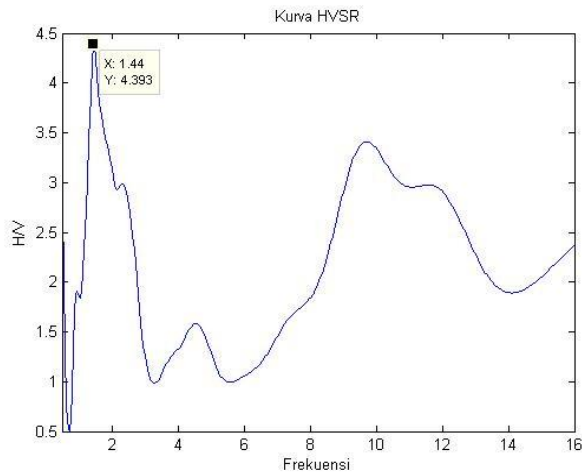
Lokasi Titik: 11
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



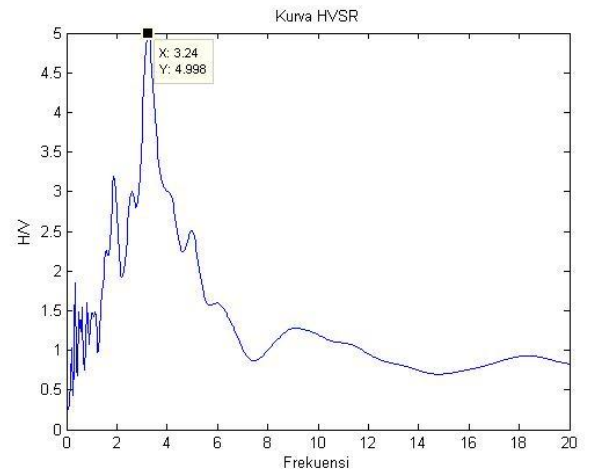
Lokasi Titik: 12
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



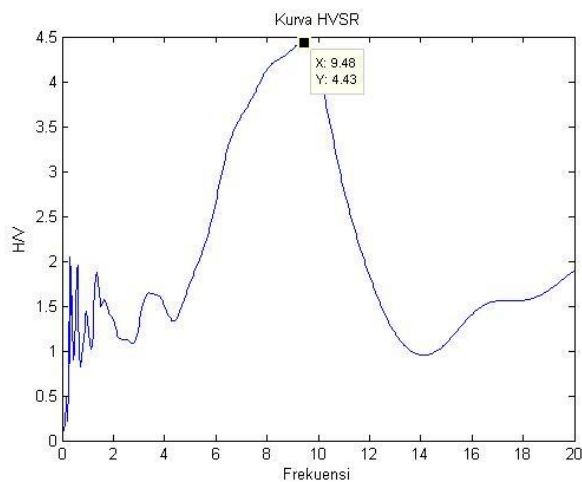
Lokasi Titik: 13
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



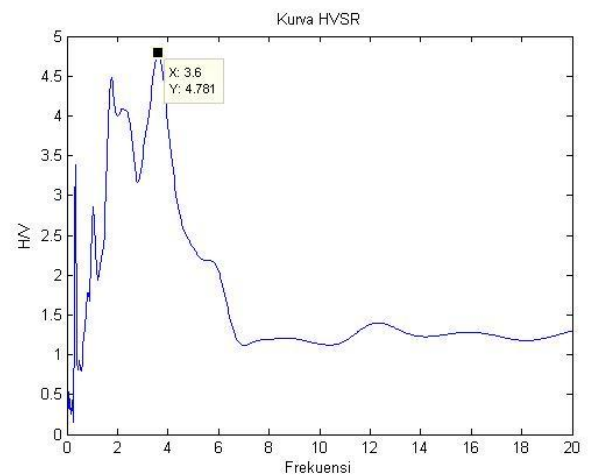
Lokasi Titik: b1
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



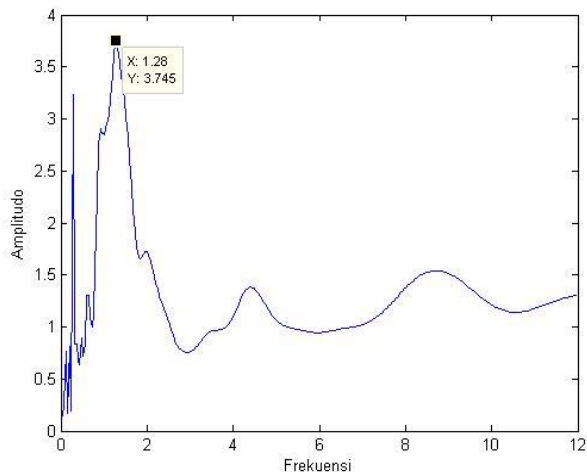
Lokasi Titik: b2
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



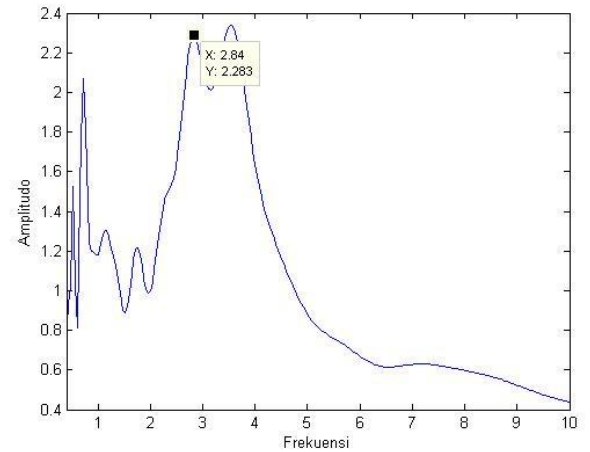
Lokasi Titik: b3
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



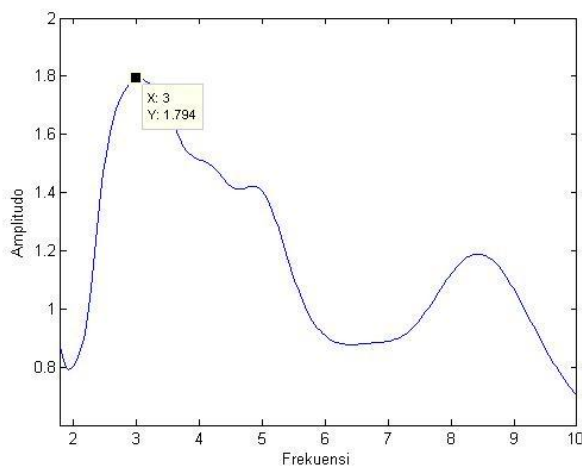
Lokasi Titik: b4
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



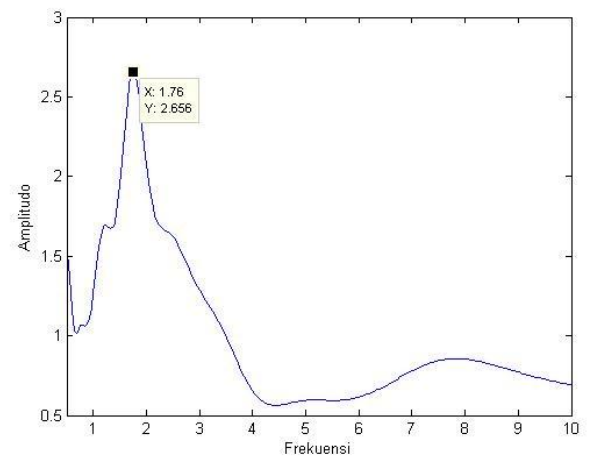
Lokasi Titik: b5
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



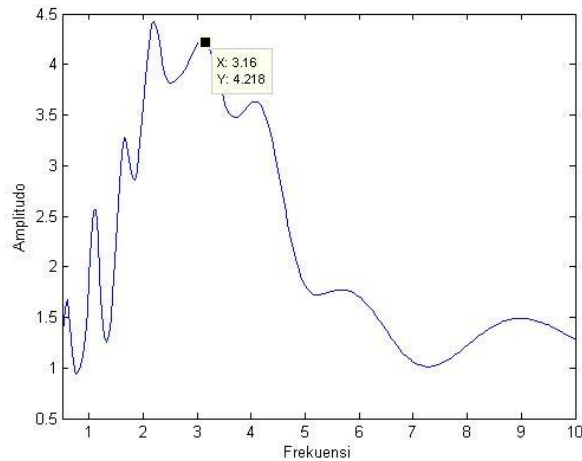
Lokasi Titik: b6
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



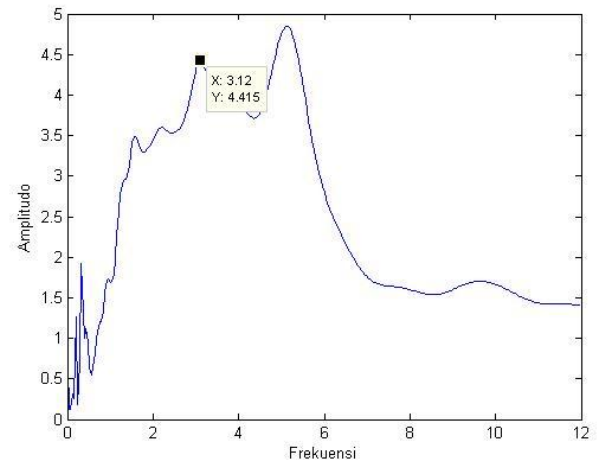
Lokasi Titik: b7
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



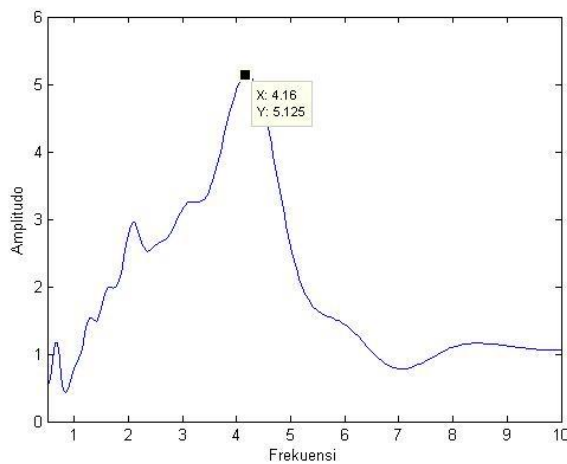
Lokasi Titik: b8
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



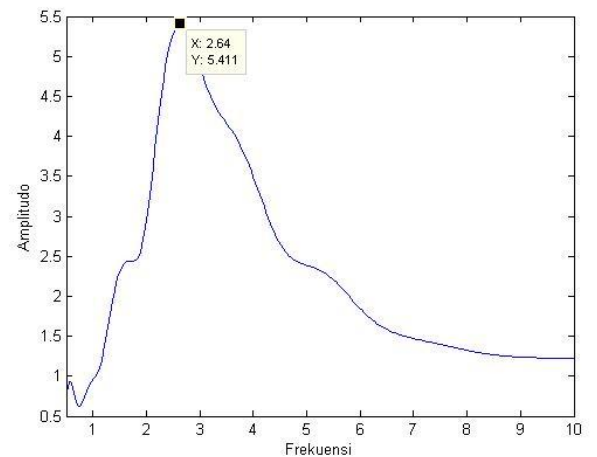
Lokasi Titik: b9
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



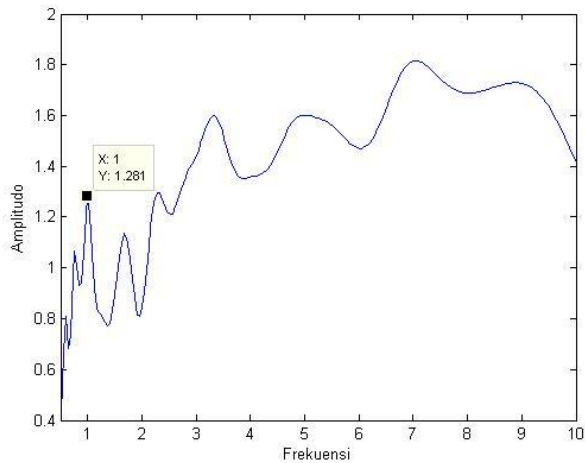
Lokasi Titik: c1
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



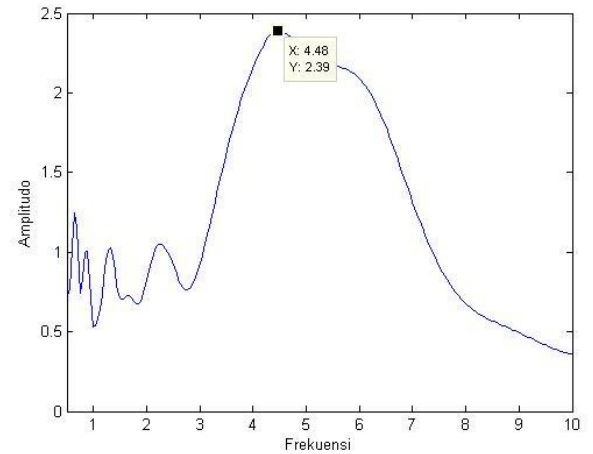
Lokasi Titik: c9
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



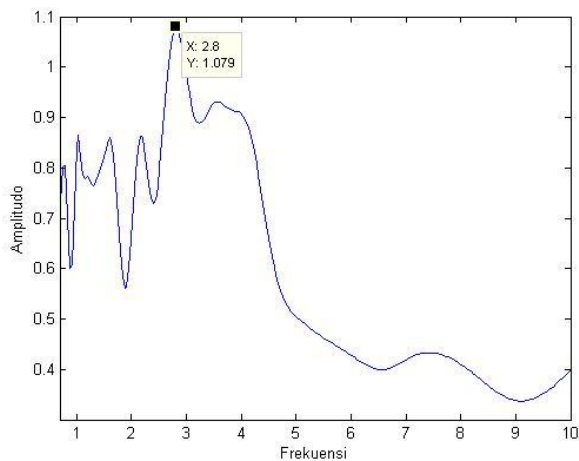
Lokasi Titik: c10
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



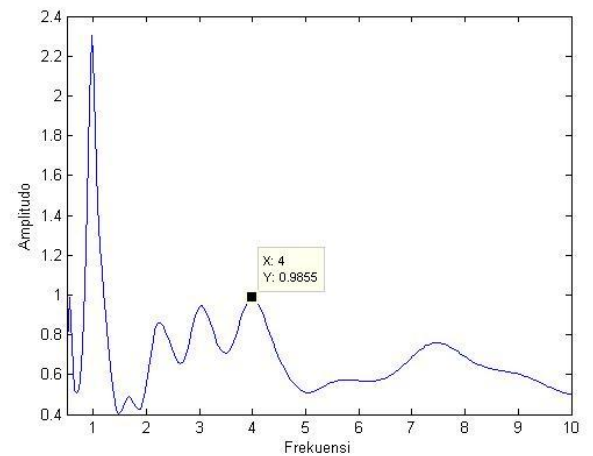
Lokasi Titik: Ta1
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



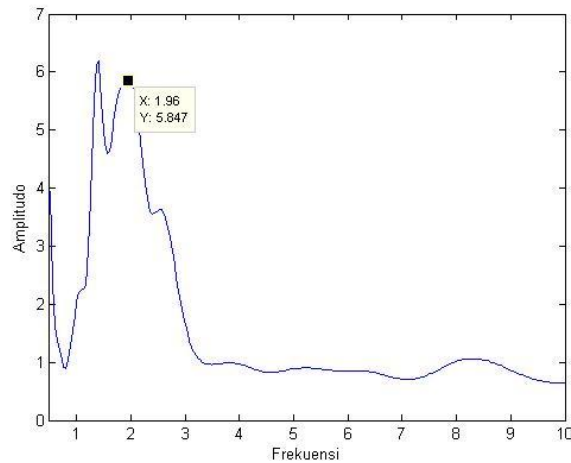
Lokasi Titik: Ta2
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



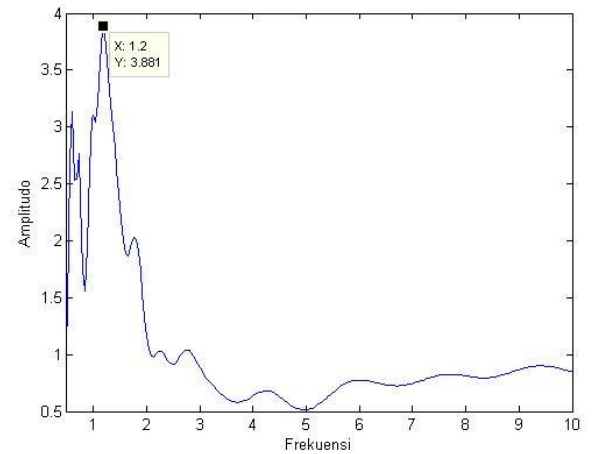
Lokasi Titik: Ta3
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



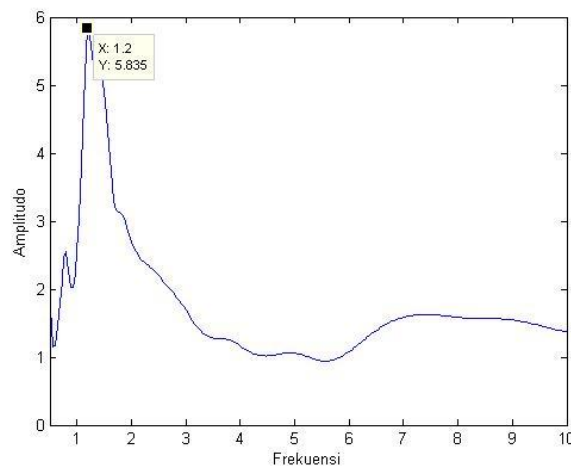
Lokasi Titik: Ta4
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



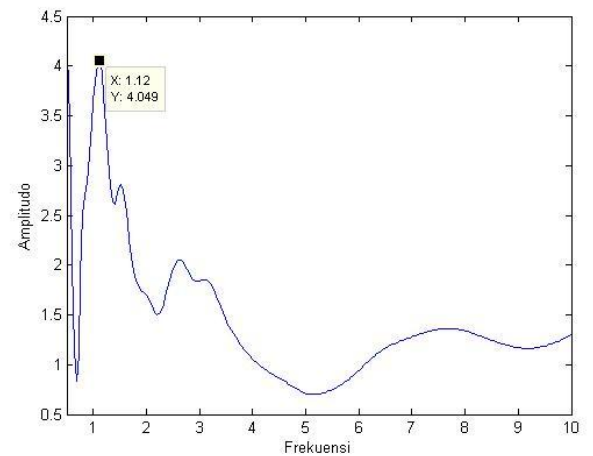
Lokasi Titik: Ta5
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



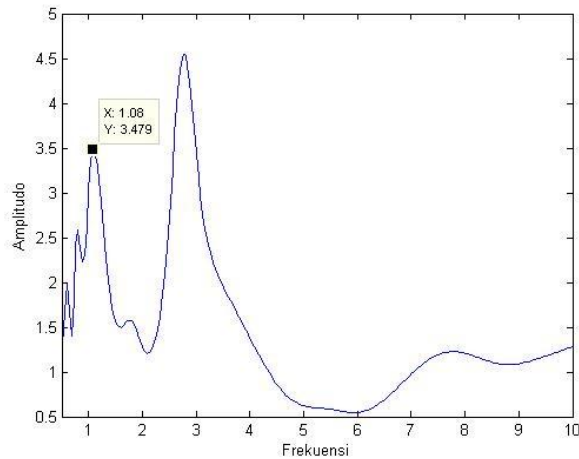
Lokasi Titik: Ta6
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



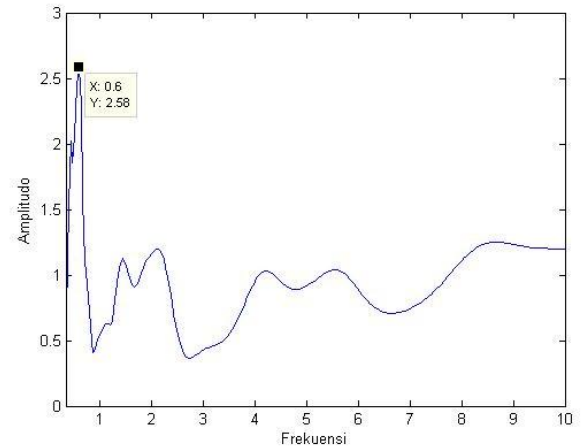
Lokasi Titik: Ta7
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



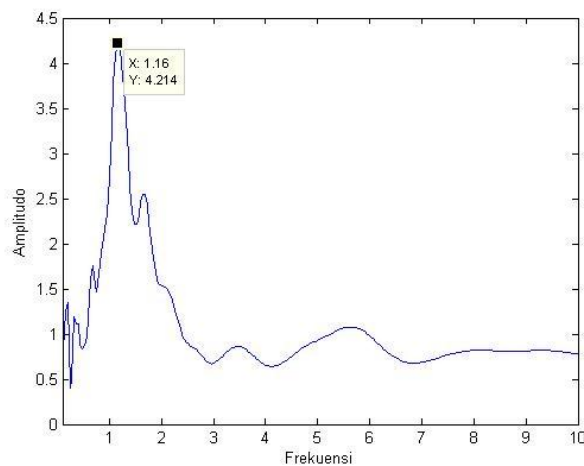
Lokasi Titik: Ta8
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



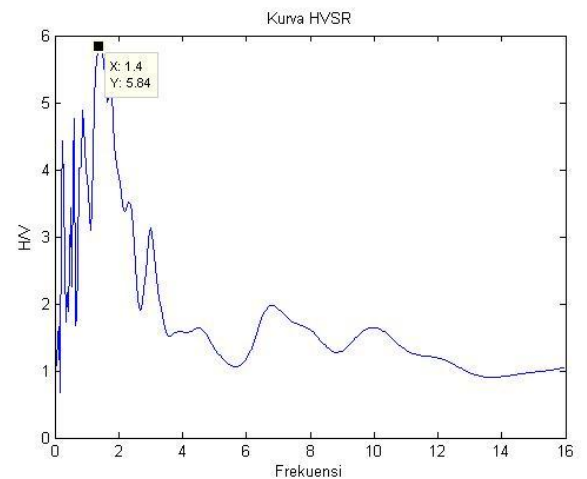
Lokasi Titik: Ta9
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



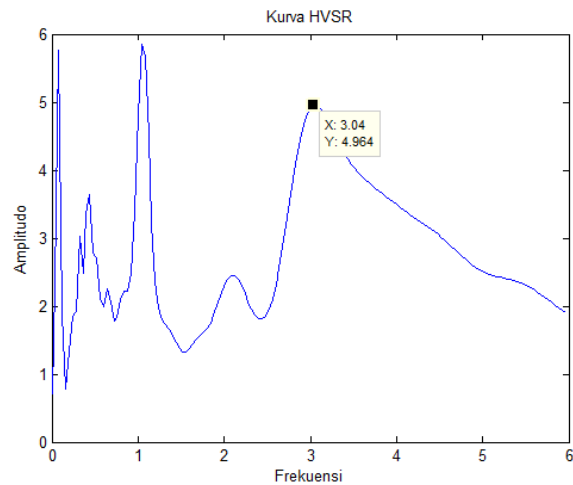
Lokasi Titik: Ta10
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



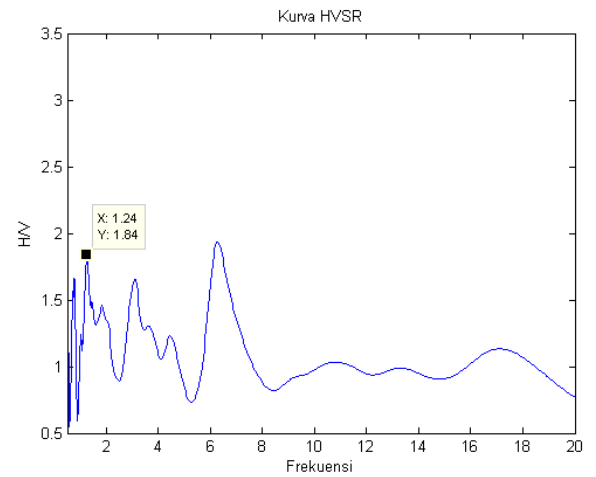
Lokasi Titik: Ta11
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



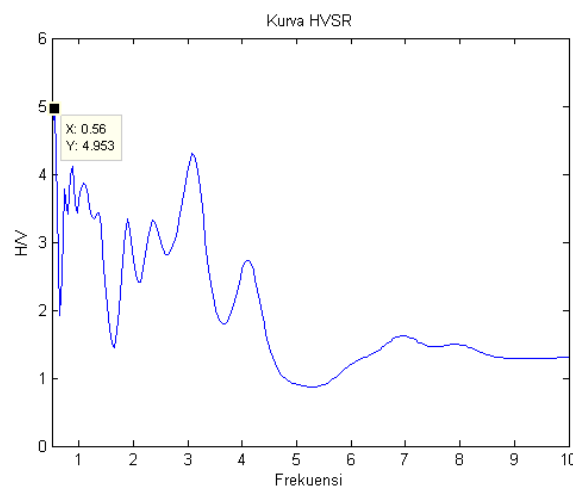
Lokasi Titik: 14
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



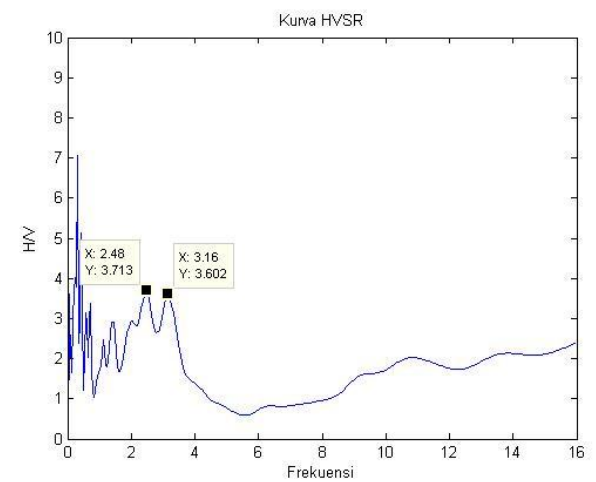
Lokasi Titik: 15
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



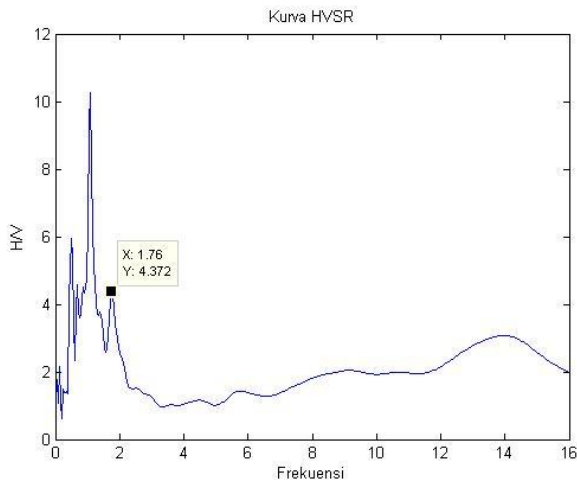
Lokasi Titik: 16
 Formasi Geologi : Semilir
 Informasi Lokasi :
 Perselingan antara breksi tuf, batu apung, tufdasit dan tufandesit serta batuan lempung tufan.



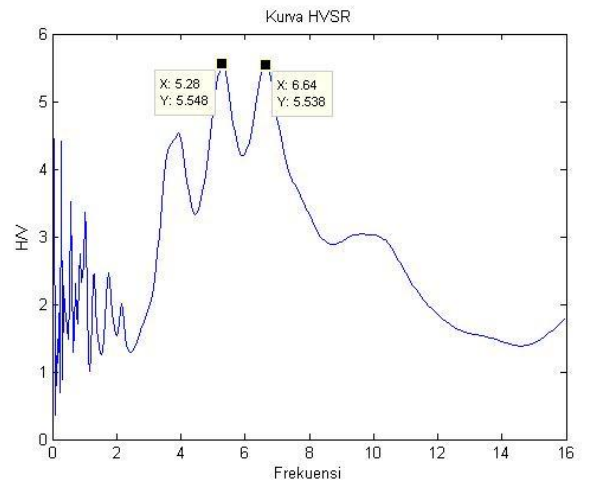
Lokasi Titik: 17
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



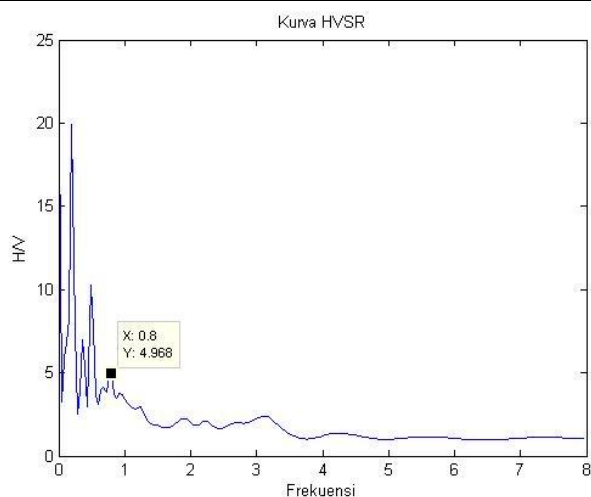
Lokasi Titik: 18
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



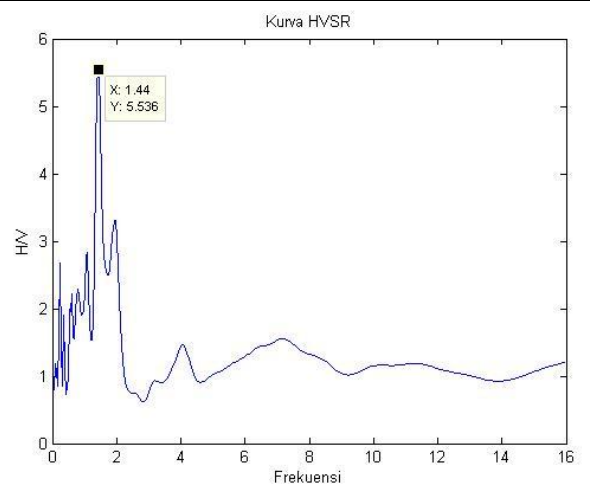
Lokasi Titik: 19
Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
Informasi Lokasi :
Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



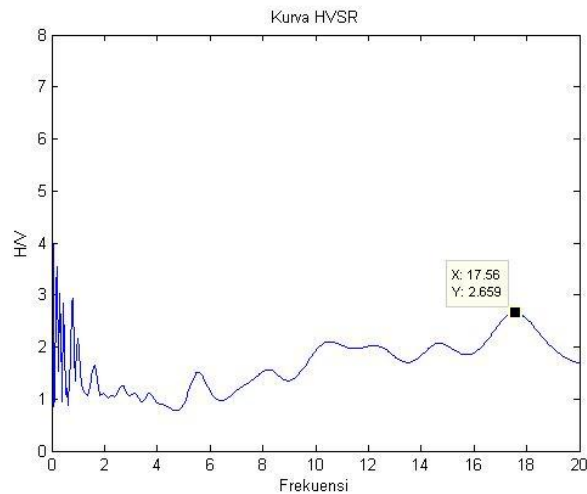
Lokasi Titik: 20
Formasi Geologi : Semilir
Informasi Lokasi :
Perselingan antara breksi tuf, batu apung, tufdasit dan tufandesit serta batuan lempung tufan.



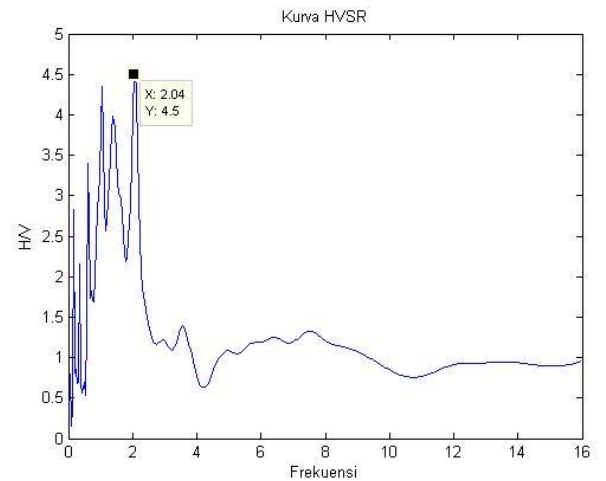
Lokasi Titik: 21
Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
Informasi Lokasi :
Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



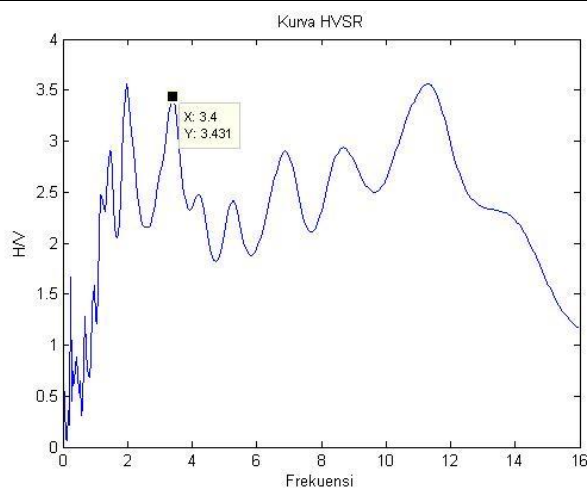
Lokasi Titik: 22
Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
Informasi Lokasi :
Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



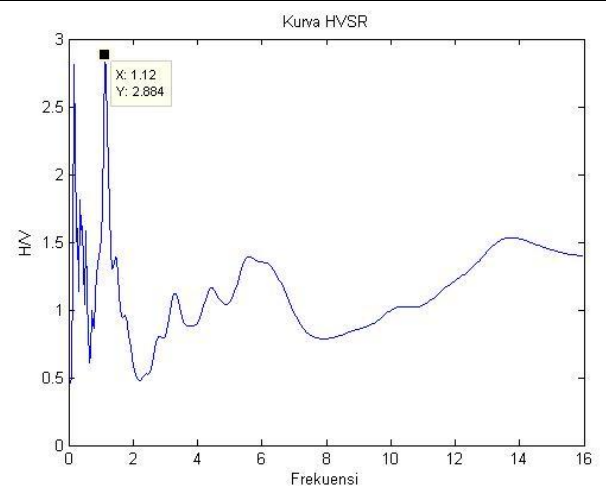
Lokasi Titik: 23
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



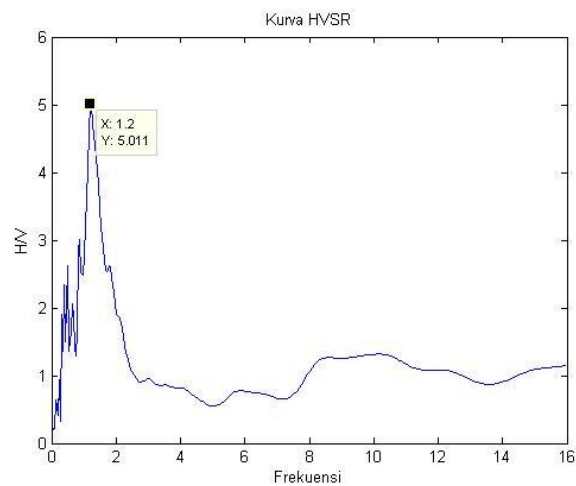
Lokasi Titik: D2
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



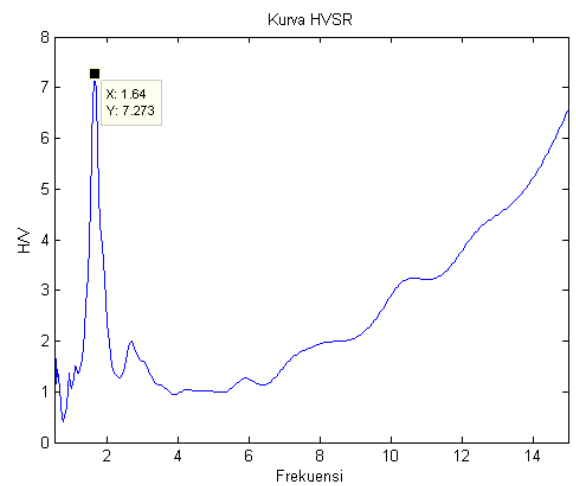
Lokasi Titik: D3
 Formasi Geologi : Wonosari
 Informasi Lokasi :
 Batuan gamping, terumbu, kalkarenit, tufan.



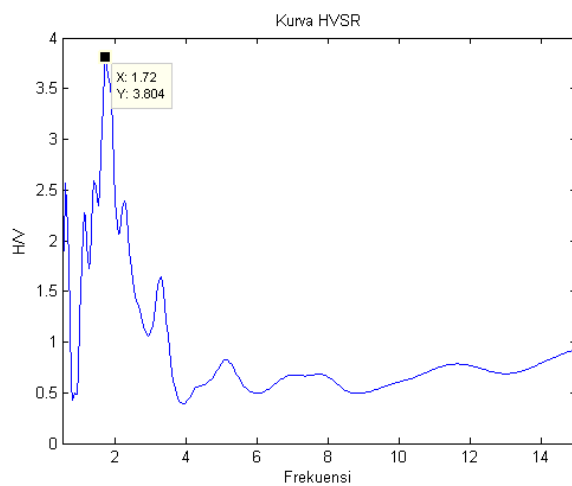
Lokasi Titik: D5
 Formasi Geologi : Alluvium
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar krakal, pasir, lanau dan lempung sepanjang sungai.



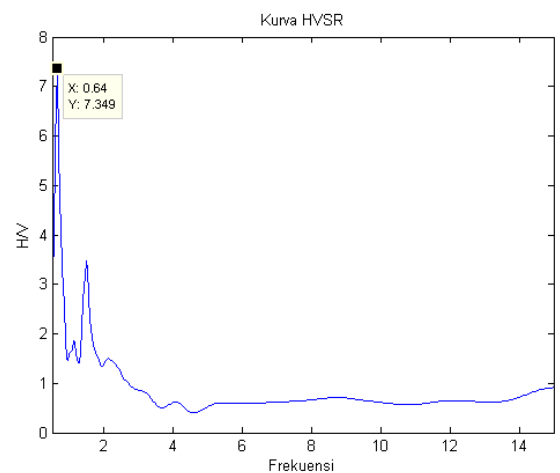
Lokasi Titik: D6
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



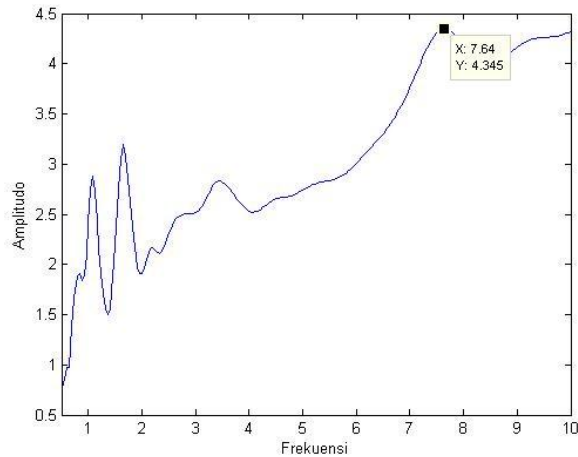
Lokasi Titik: D7
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



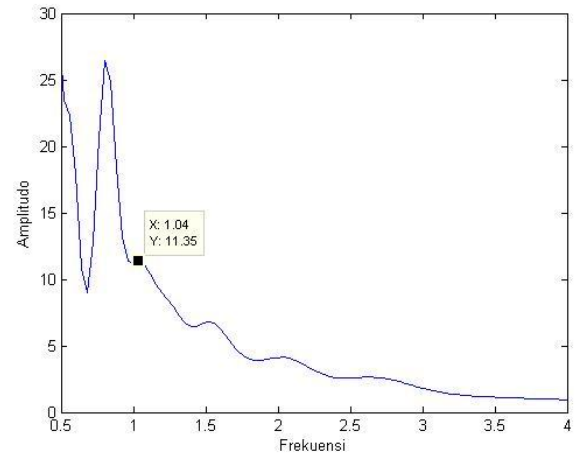
Lokasi Titik: D8
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



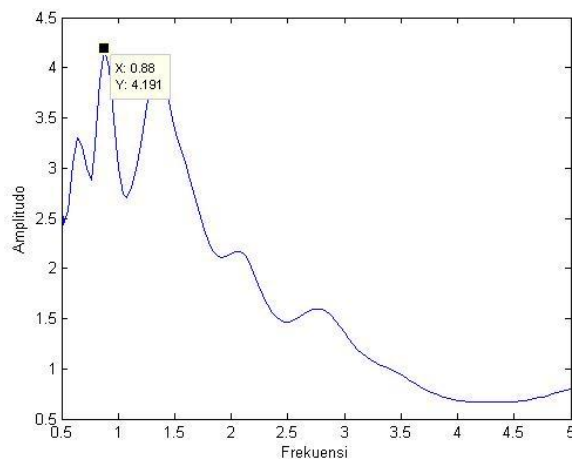
Lokasi Titik: D9
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



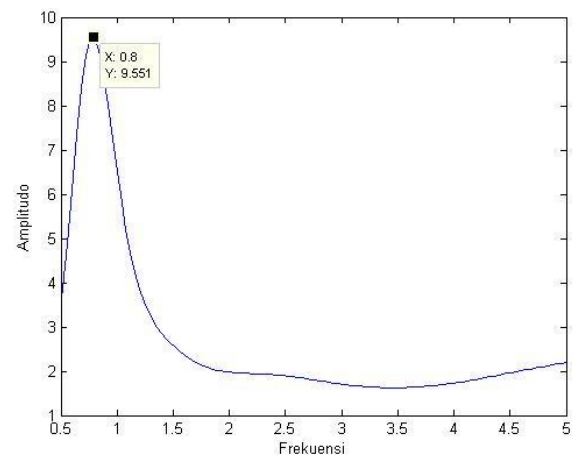
Lokasi Titik: 24
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



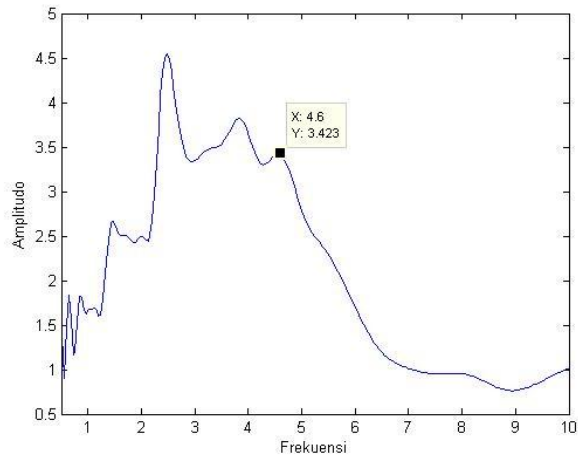
Lokasi Titik: 25
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



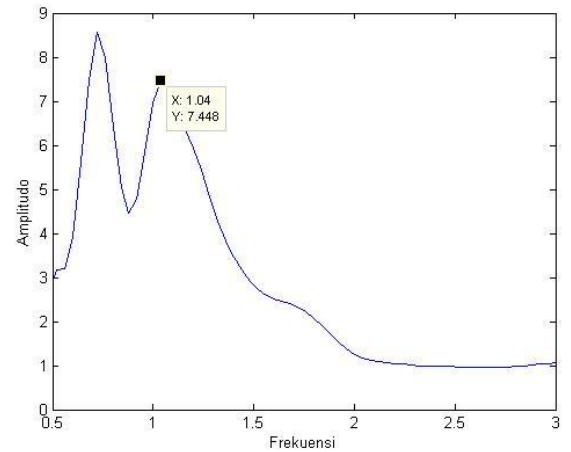
Lokasi Titik: 26
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



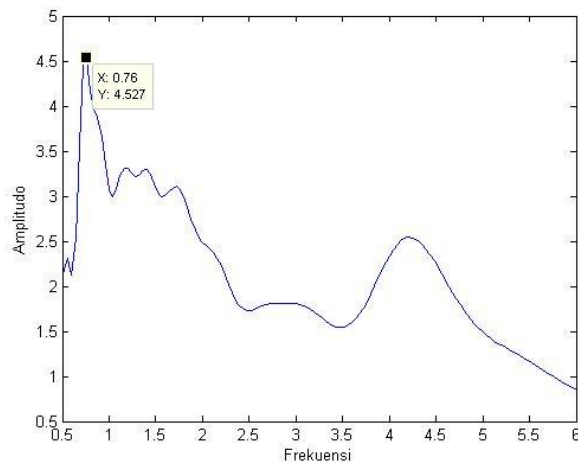
Lokasi Titik: 27
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



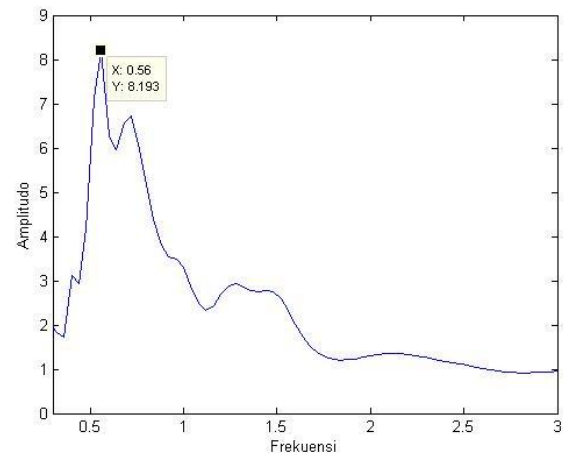
Lokasi Titik: 28
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



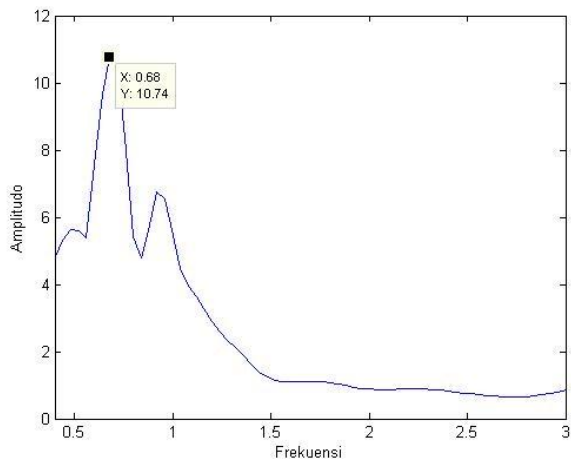
Lokasi Titik: 30
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



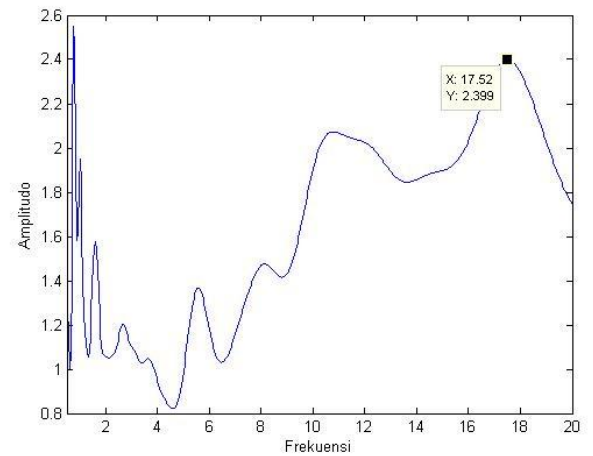
Lokasi Titik: 31
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



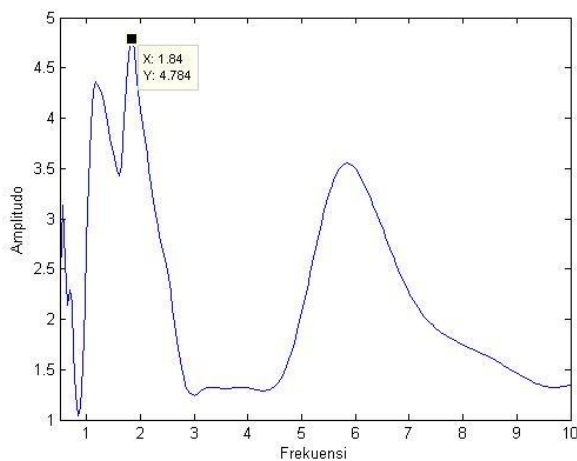
Lokasi Titik: 32
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelahan larva tak terpisahkan.



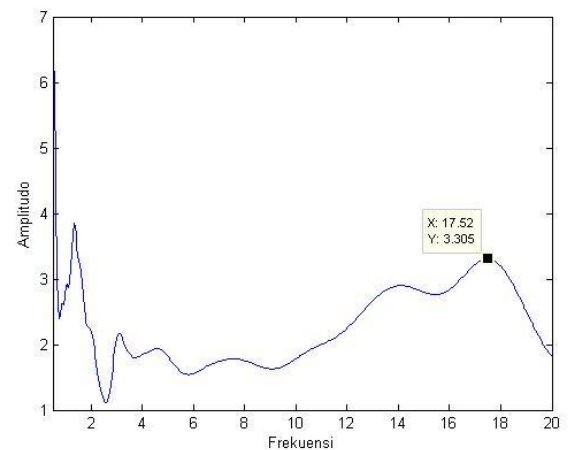
Lokasi Titik: 33
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



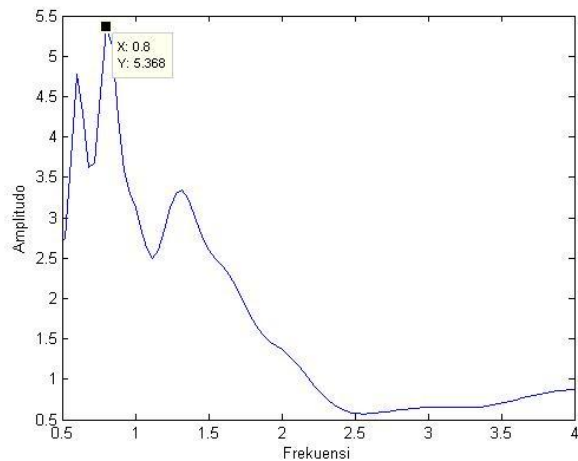
Lokasi Titik: 34
 Formasi Geologi : Semilir
 Informasi Lokasi :
 Perselingan antara breksi tuf, batu apung, tufdasit dan tufandesit serta batuan lempung tufan.



Lokasi Titik: 36
 Formasi Geologi : Semilir
 Informasi Lokasi :
 Perselingan antara breksi tuf, batu apung, tufdasit dan tufandesit serta batuan lempung tufan.



Lokasi Titik: 38
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

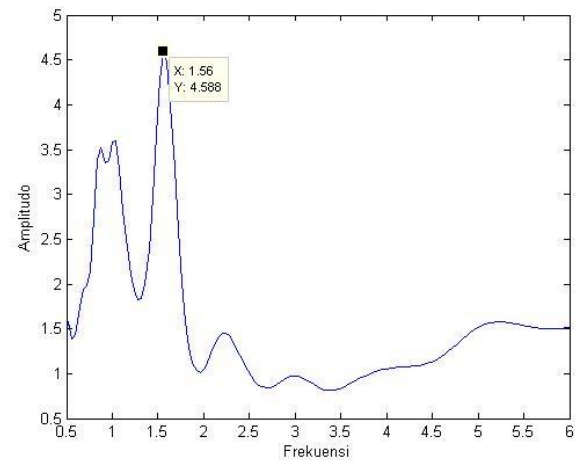


Lokasi Titik: 40

Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

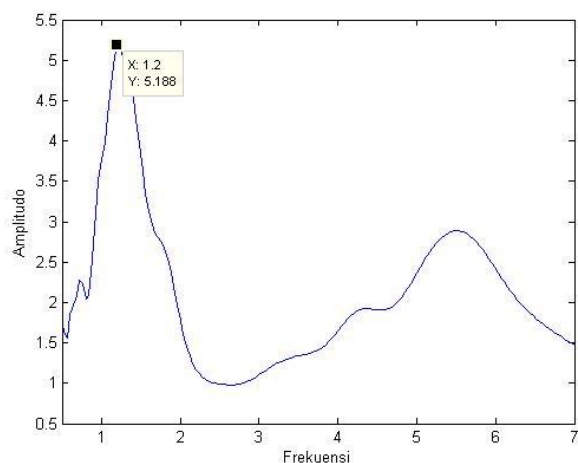


Lokasi Titik: 41

Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

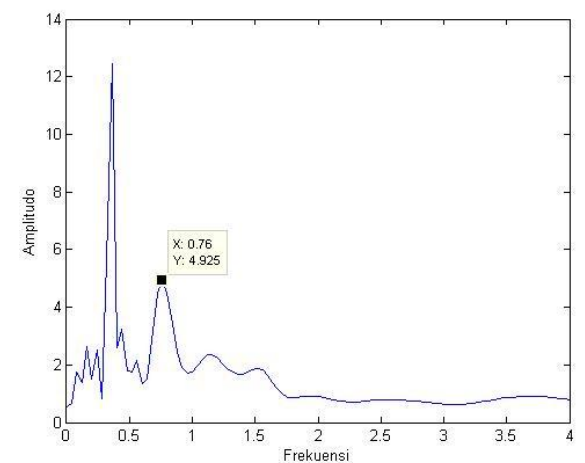


Lokasi Titik: 43

Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

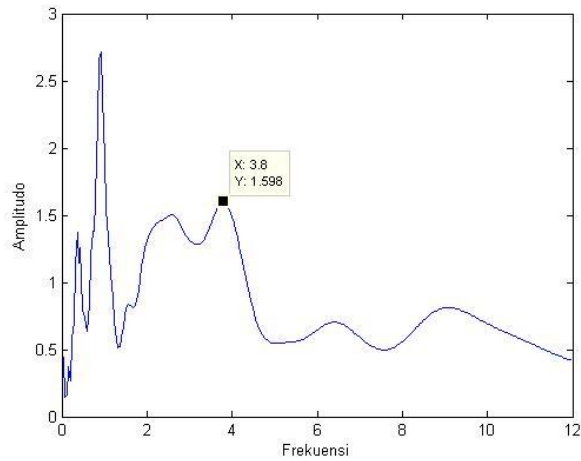


Lokasi Titik: 45

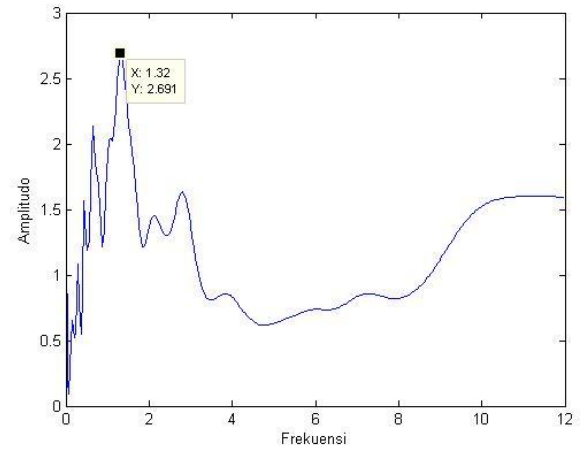
Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

Informasi Lokasi :

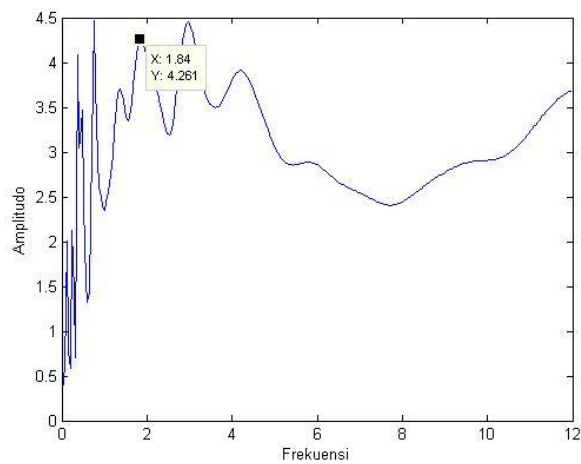
Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



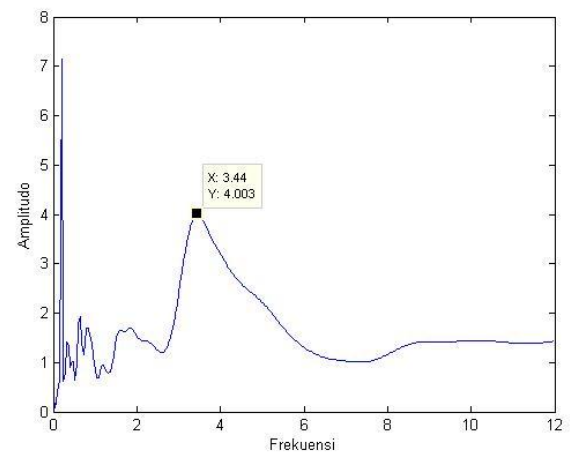
Lokasi Titik: t1
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



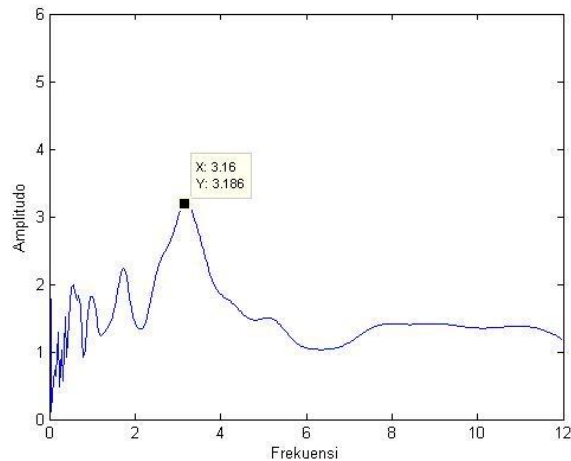
Lokasi Titik: t4
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



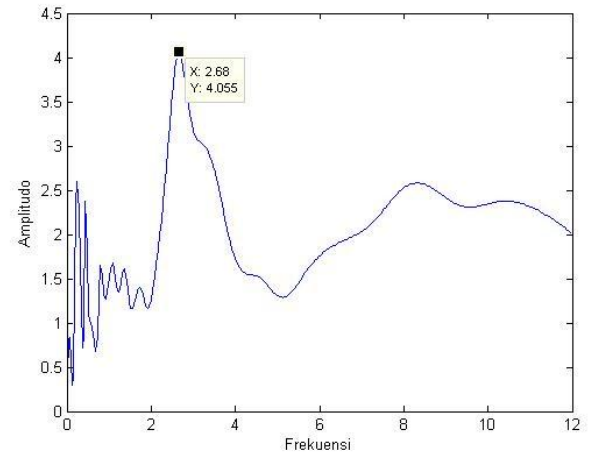
Lokasi Titik: t5
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



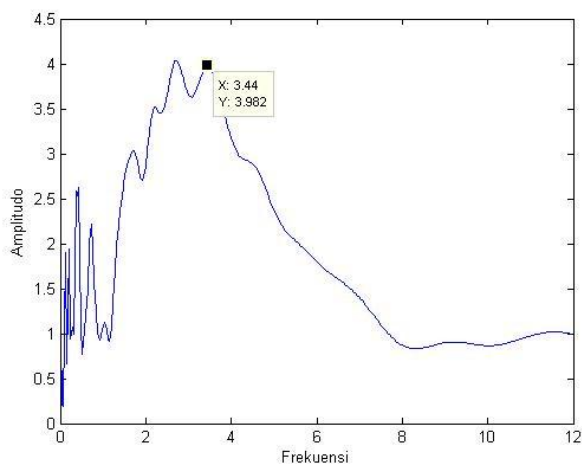
Lokasi Titik: t9
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



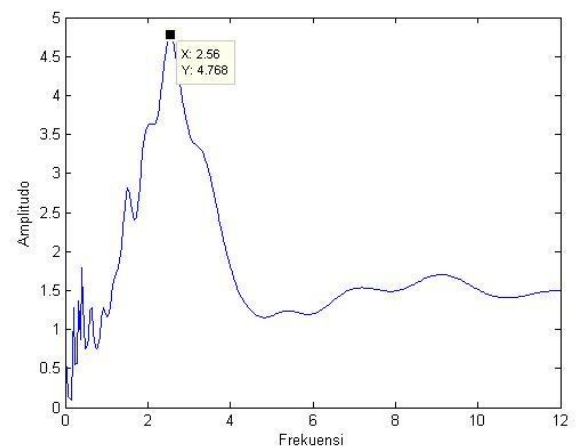
Lokasi Titik: t11
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



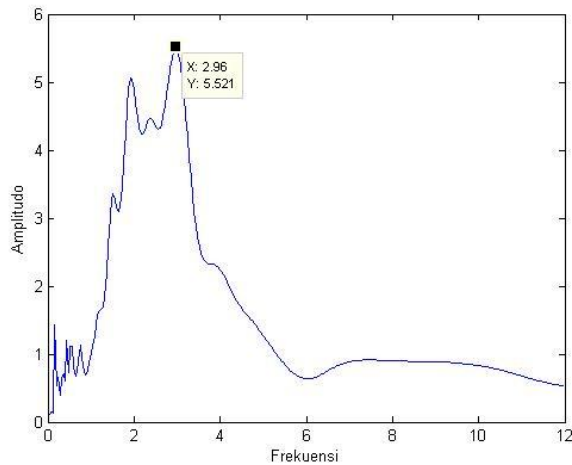
Lokasi Titik: t13
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



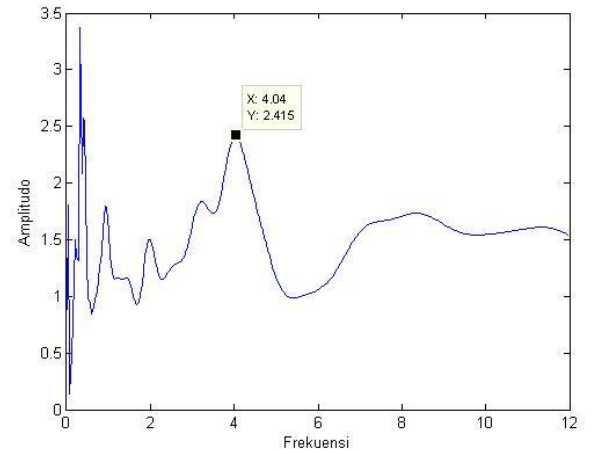
Lokasi Titik: t19
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



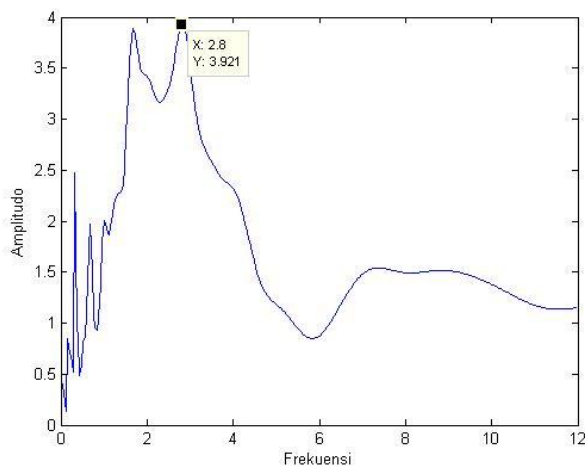
Lokasi Titik: t23
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



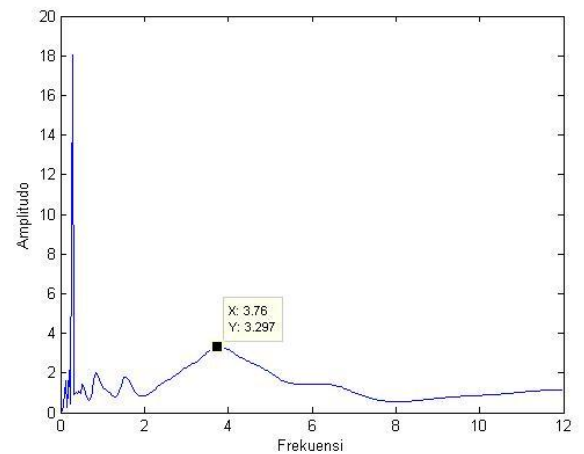
Lokasi Titik: t24
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



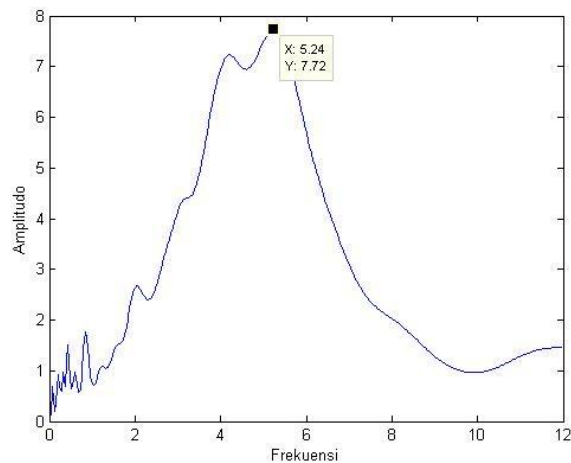
Lokasi Titik: t25
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



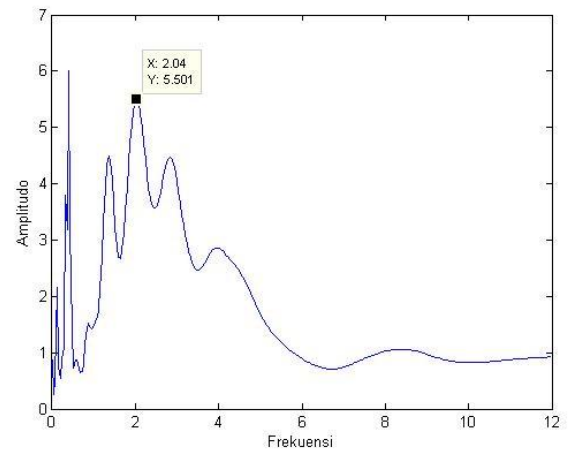
Lokasi Titik: t26
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



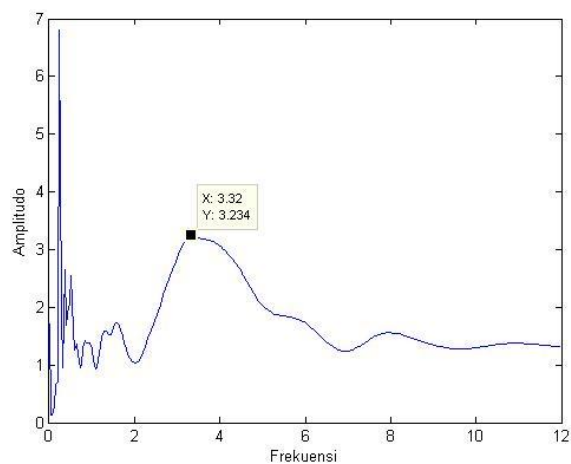
Lokasi Titik: t28
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



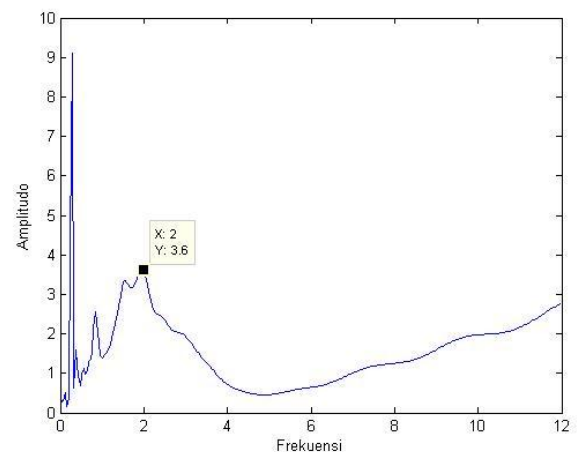
Lokasi Titik: t34
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



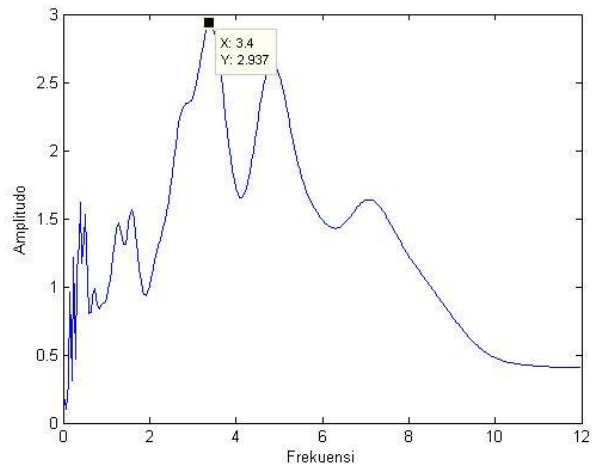
Lokasi Titik: t35
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



Lokasi Titik: t37
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



Lokasi Titik: t43
 Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda
 Informasi Lokasi :
 Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.



Lokasi Titik: t48

Formasi Geologi : Endapan Merapi Muda

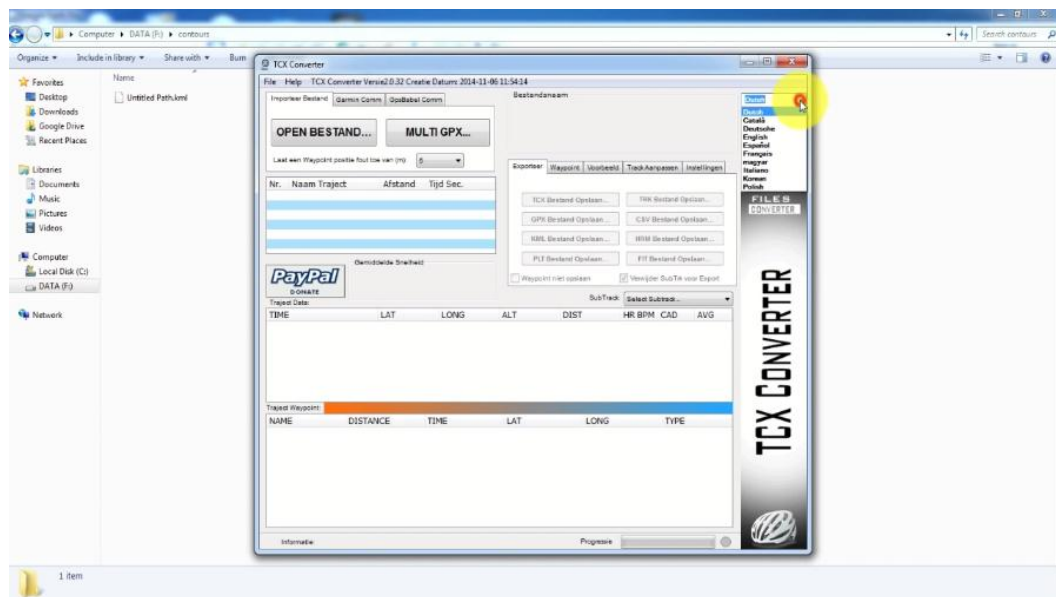
Informasi Lokasi :

Batuan dasar breksi, aglomerat, dan lelehan larva tak terpisahkan.

Lampiran 9. Program TCX Converter

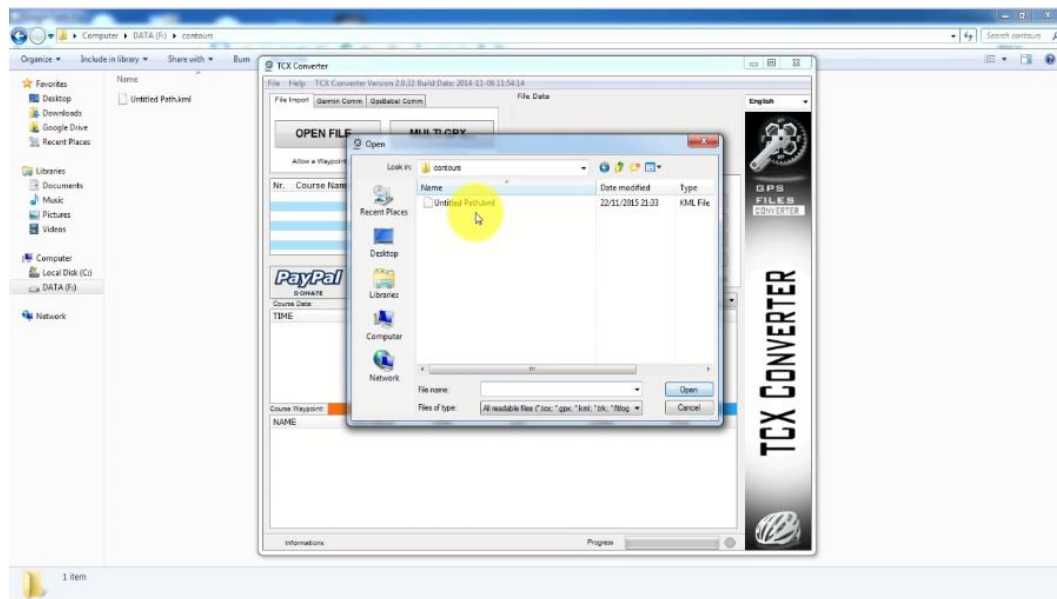
Untuk mengubah data dari *software Google Earth* dalam format (.kml, .gpx) ke dalam format (.csv) dengan *software TCX versi 20.32* tahun 2014, adalah sebagai berikut.

1. Membuka aplikasi *TCX versi 20.32*, kemudian pilih bahasa yang akan digunakan dan akan muncul tampilan seperti Gambar L13.



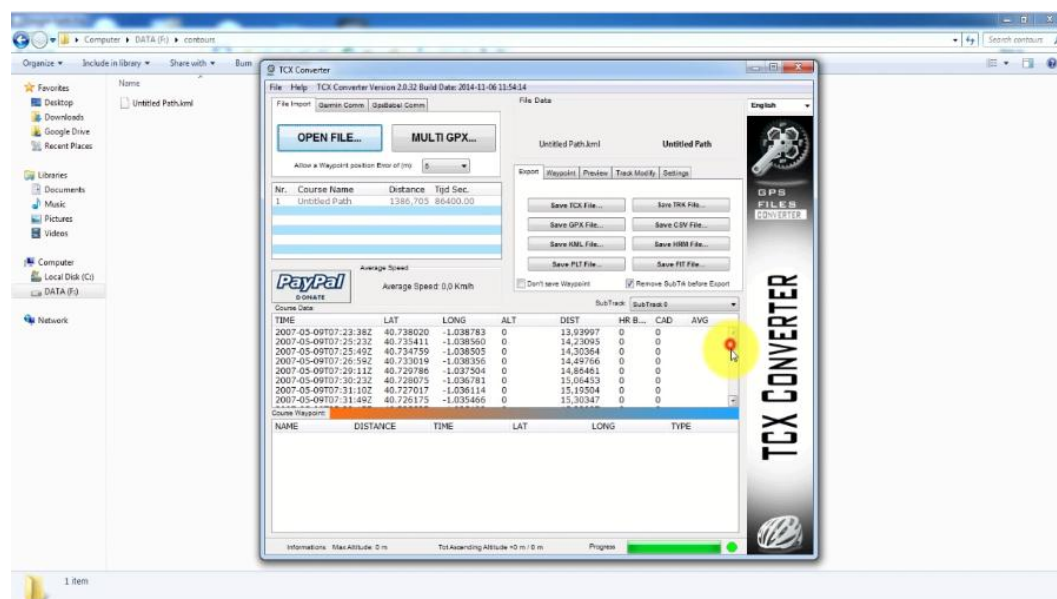
Gambar L13. Tampilan awal *software TCX*.

2. Klik *Open file*, pilih data yang diperoleh dari *Google Earth* dalam format .kml, .gpx



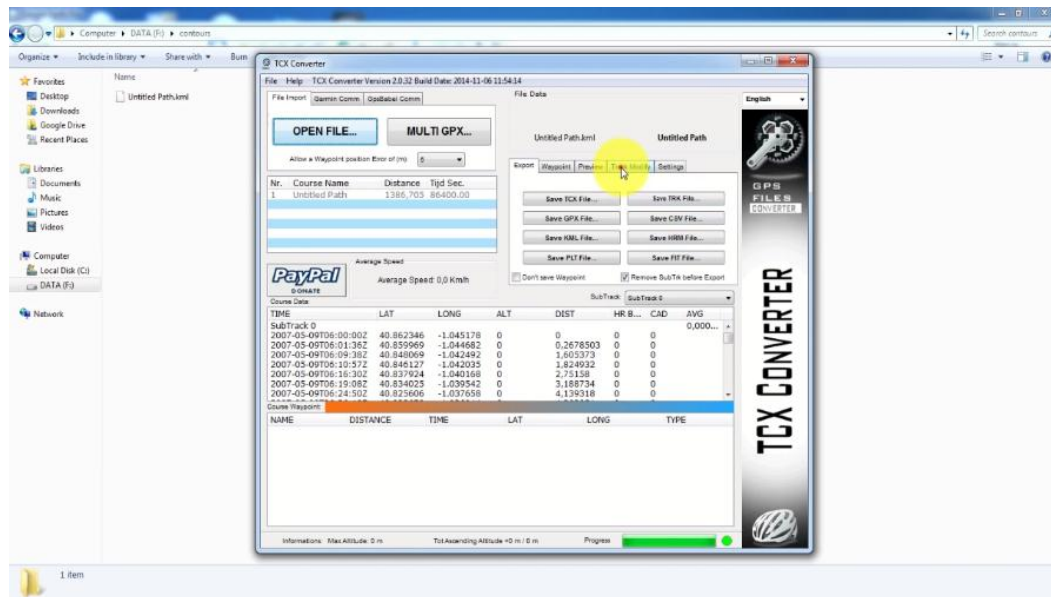
Gambar L14. Tampilan saat pemilihan file dalam format (.kml, .gpx).

3. Saat proses *Open file* selesai, akan muncul data seperti tampilan berikut.



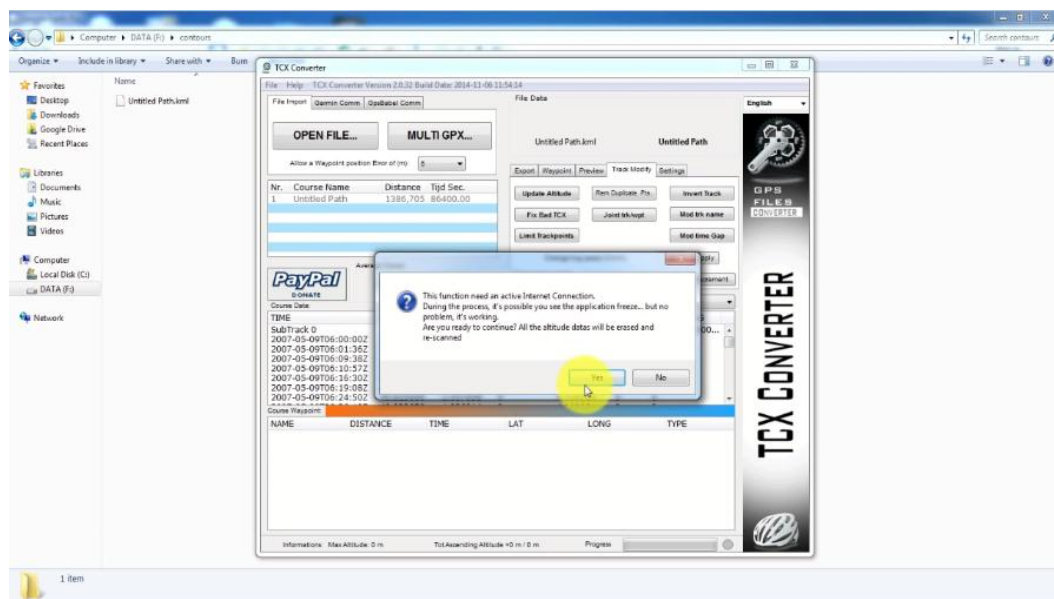
Gambar L15. Tampilan data file yang sudah dipilih dalam format (.kml, .gpx).

4. Klik *Track Modify*, kemudian akan muncul tampilan seperti berikut.



Gambar L16. Tampilan menu *Track Modify*.

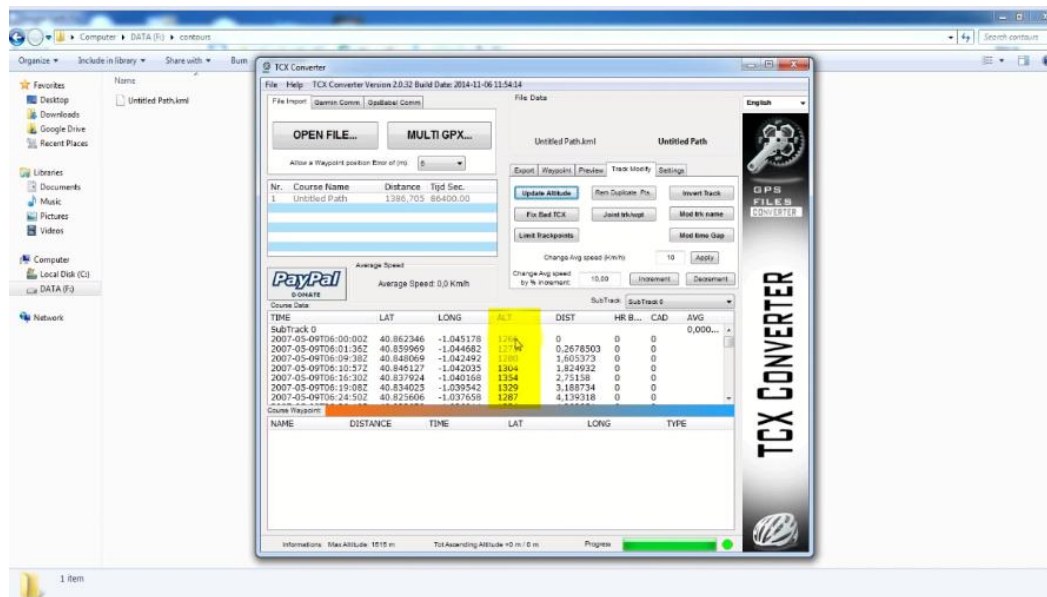
5. Pilih *Update Altitude* pada menu *Track Modify*, akan muncul tampilan sebagai berikut (dalam *update altitude* kondisi laptop harus dalam keadaan *online* atau terhubung dengan internet). Kemudian klik *Yes*.



Gambar L17. Tampilan saat proses *Update Altitude*.

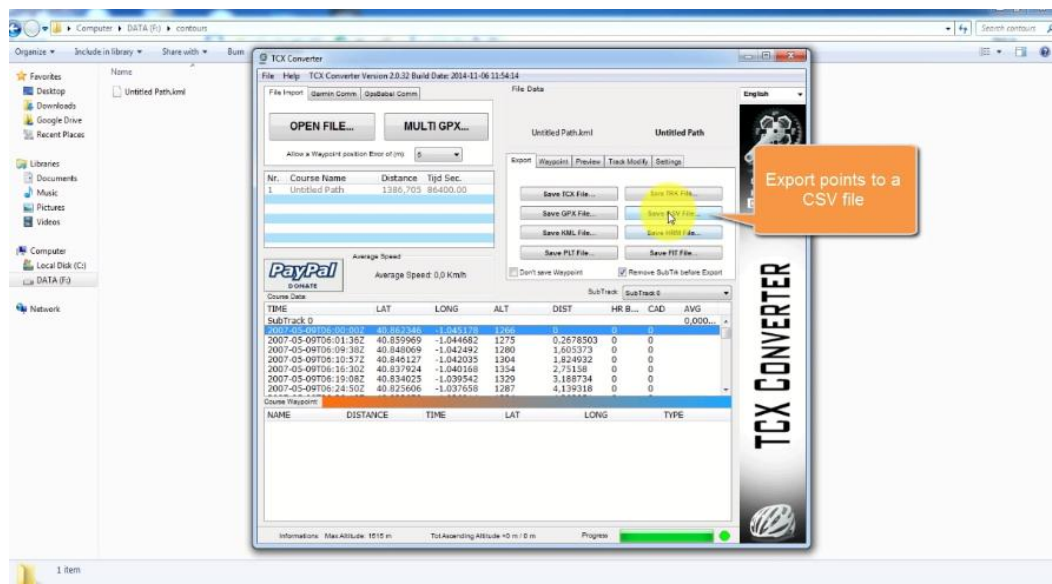
6. Tunggu proses sampai selesai, akan terlihat hijau penuh saat progress selesai. Untuk proses ini membutuhkan waktu yang cukup lama tergantung banyaknya

data. Saat proses selesai maka akan muncul nilai *Alt*, seperti yang muncul pada tampilan sebagai berikut.



Gambar L18. Tampilan saat proses *Update Altitude* selesai.

7. Klik *Export* kemudian pilih menu *Save Csv File*.



Gambar L19. Tampilan mengubah format (.kml, .gpx) ke dalam format (.csv).

8. Setelah disimpan dalam format .csv kemudian buka dalam *software MS-Excel 2010*. Akan muncul data *latitude*, *longitude* dan *altitude* yang akan digunakan dalam pemodelan topografi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	UNIX TIME	TIME	LAT	LONG	ALT	DIST	HR	CAD	TEMP	POWER																						
1	1178890400	2007-05-09T00	40,862348	-1,0401198	1266	0	0	0	No Data	No Data																						
2	1178890496	2007-05-09T01	40,859965	-1,0444682	1275	0,2678503	0	0	No Data	No Data																						
3	1178890576	2007-05-09T02	40,846069	-1,0424982	1280	1,603373	0	0	No Data	No Data																						
4	1178891057	2007-05-09T03	40,846127	-1,042033	1304	1,824932	0	0	No Data	No Data																						
5	1178891390	2007-05-09T04	40,837924	-1,040168	1354	2,75158	0	0	No Data	No Data																						
6	1178891548	2007-05-09T05	40,834025	-1,039542	1329	3,188734	0	0	No Data	No Data																						
7	1178891890	2007-05-09T06	40,825606	-1,037658	1287	4,139318	0	0	No Data	No Data																						
8	1178891970	2007-05-09T07	40,823678	-1,036914	1224	4,362631	0	0	No Data	No Data																						
9	1178892084	2007-05-09T08	40,820867	-1,036382	1208	4,678933	0	0	No Data	No Data																						
10	1178892363	2007-05-09T09	40,818511	-1,036213	1196	4,8971	0	0	No Data	No Data																						
11	1178892312	2007-05-09T10	40,815245	-1,03532	1195	5,312083	0	0	No Data	No Data																						
12	1178892373	2007-05-09T11	40,813723	-1,035188	1217	5,481778	0	0	No Data	No Data																						
13	1178892618	2007-05-09T12	40,807838	-1,034663	1217	6,18055	0	0	No Data	No Data																						
14	1178892836	2007-05-09T13	40,802177	-1,03477	1234	6,788525	0	0	No Data	No Data																						
15	1178892924	2007-05-09T14	40,79999	-1,03487	1243	7,012132	0	0	No Data	No Data																						
16	1178892994	2007-05-09T15	40,798251	-1,03472	1268	7,29608	0	0	No Data	No Data																						
17	1178893090	2007-05-09T16	40,795881	-1,034534	1282	7,472718	0	0	No Data	No Data																						
18	1178893142	2007-05-09T17	40,794557	-1,034462	1255	7,818188	0	0	No Data	No Data																						
19	1178893187	2007-05-09T18	40,793458	-1,034596	1262	7,741821	0	0	No Data	No Data																						
20	1178893240	2007-05-09T19	40,792138	-1,034771	1259	7,889283	0	0	No Data	No Data																						
21	1178893310	2007-05-09T20	40,790385	-1,034908	1249	8,084756	0	0	No Data	No Data																						
22	1178893372	2007-05-09T21	40,788849	-1,035085	1246	8,258182	0	0	No Data	No Data																						
23	1178893442	2007-05-09T22	40,787096	-1,035260	1264	8,451582	0	0	No Data	No Data																						
24	1178893504	2007-05-09T23	40,785375	-1,035072	1278	8,621199	0	0	No Data	No Data																						
25	1178893663	2007-05-09T24	40,783621	-1,035597	1307	9,06362	0	0	No Data	No Data																						
26	1178893742	2007-05-09T25	40,77965	-1,035717	1287	9,283199	0	0	No Data	No Data																						
27	1178893939	2007-05-09T26	40,774798	-1,036742	1260	9,830233	0	0	No Data	No Data																						
28	1178894212	2007-05-09T27	40,768003	-1,037313	1283	10,58622	0	0	No Data	No Data																						
29	1178894273	2007-05-09T28	40,766467	-1,037489	1290	10,75968	0	0	No Data	No Data																						
30	1178894515	2007-05-09T29	40,760513	-1,038889	1201	11,43047	0	0	No Data	No Data																						
31	1178894585	2007-05-09T30	40,758774	-1,038554	1207	11,62446	0	0	No Data	No Data																						

Gambar L20. Tampilan data dalam format (.csv) pada *software MS-Excel 2010*.

Lampiran 10. Dokumentasi Penelitian



